

УДК 666.3:662.998

О.В. Суворова, А.В. Мотина, Н.К. Манакова

## Теплоизоляционные материалы на основе микрокремнезема

O.V. Suvorova, A.V. Motina, N.K. Manakova

### Thermal insulation materials on the basis of microsilica

**Аннотация.** Установлена возможность получения на основе аморфного микрокремнезема wollastonite-содержащей керамической матрицы и композиционных материалов на ее основе с пористыми наполнителями.

**Abstract.** The main areas of silica application have been examined in the paper. It has been found that microsilica can be used in manufacture of wollastonite-containing ceramic matrixes and composite materials with expanding shale and nepheline-process waste as fillers.

**Ключевые слова:** микрокремнезем, wollastonite, керамическая матрица, пористый наполнитель

**Key words:** microsilica, wollastonite, ceramic matrix, porous filler

#### 1. Введение

Приоритетным направлением в производстве теплоизоляционных материалов является разработка новых технологий получения качественных материалов на основе техногенных отходов промышленности, позволяющих не только снизить себестоимость продукции, но и сберечь природные ресурсы (Пак, Сухорукова, 2013; Кудяков и др., 2002; 2005; 2006а; 2006б; Тихомирова, Скорина, 2008).

При кислотной переработке нефелинового концентрата с получением глинозема, содопродуктов, поташа, солей алюминия образуется большой объем кремнеземсодержащих продуктов. Вопрос использования микрокремнезема является одним из основных при оценке экономической эффективности технологии в целом. В связи с этим переработка кремнеземсодержащих отходов в строительные материалы является актуальным вопросом на сегодняшний день.

В настоящее время одним из востребованных направлений современной науки является получение синтетического wollastonite, в качестве исходного сырья используется мел, кварцевый песок, мрамор, опоку, известь и гель кремниевой кислоты. Возможно также получение wollastonite из недефицитного кремнеземистого и известкового сырья. Выход wollastonite при этом достигает 90 %, что значительно больше, чем при его синтезе на основе извести и тонкомолотого кварцевого песка (Салтеевская и др., 1974).

Важными технологическими свойствами wollastonite являются высокая химическая стойкость в различных средах, небольшая удельная масса, уникальные диэлектрические свойства, низкая теплопроводность, игольчатый габитус частиц, а также экологическая чистота и безопасность применения. Это обусловило широкое применение wollastonite при производстве строительных материалов.

Различные исследования подтвердили принципиальную возможность использования природного и синтетического wollastonite в качестве сырья для получения теплоизоляционной керамики. Особенность поведения материалов на основе wollastonite при обжиге заключается в том, что wollastonite-массы имеют узкий интервал спекания, поэтому исследование условий спекания имеет особое значение. Оптимальный температурный интервал обжига материала на основе wollastonite 1 000-1 050 °С. В этом интервале процессы спекания происходят полностью, что ведет к получению более плотного и прочного материала (Демиденко, Конкина, 2003).

Известно, что введение wollastonite в керамические массы обеспечивает сокращение продолжительности обжига, снижение его температуры и усадки изделий, упрочнение материалов и т.д. Wollastonite, являясь сильным плавнем, позволяет снизить температуру обжига керамики на 50-70 °С и повысить плотность и механическую прочность на 25 % (Адылов и др., 2002).

На стадиях формования и сушки wollastonite играет роль наполнителя, улучшая формовочные и сушильные свойства, а при высокотемпературном обжиге участвует в жидкофазном спекании как плавень (при температурах выше 1 000 °С), одновременно при низкой активности матрицы повышает стойкость к деформации в процессе обжига. Определенное влияние на армирующее действие wollastonite оказывает его взаимодействие с матрицей. Чрезмерное усиление прочности его связи с матрицей уменьшает армирующее действие (Никонова и др., 2003).

В современных условиях для удовлетворения требований строительства ограждающих конструкций (в чердачных, подвальных перекрытиях) появилась востребованность в создании и применении гранулированного теплоизоляционного материала, исходным сырьем для которого может служить микрокремнезем техногенного происхождения. Так, большое количество работ посвящено получению зернистого пеносиликата путем приготовления жидкостекольной композиции, гранулирования и последующей термообработки гранул.

Учитывая образование большого количества техногенных продуктов и необходимость минимизации их влияния на окружающую среду, целью данной работы являлось исследование возможности получения керамической волластонитсодержащей матрицы, пористого наполнителя и композиционных материалов на основе микрокремнезема.

## 2. Получение волластонитсодержащей керамической матрицы

При получении керамической матрицы использовалась технологическая проба кремнеземсодержащего продукта (МК) кислотной переработки нефелина с опытной установки "Глинозем", действующей на ОАО "Апатит". Продукт представляет собой в основном аморфный микрокремнезем. В качестве кальцийсодержащего компонента для получения волластонита, а также для интенсификации процесса жидкофазного спекания использовались карбонаты (КБ) Ковдорского массива, а с целью удешевления конечного продукта – хвосты обогащения апатито-магнетитовых руд (КО) рудника "Железный" (г. Ковдор). Наличие большого количества щелочного компонента в апатито-нефелиновых отходах (АНХ) дало возможность использования их при получении керамических материалов с целью снижения температуры обжига и улучшения спекания масс. Для регулирования свойств жидкостекольной композиции и улучшения показателей качества пористого наполнителя использовалась алюмосиликатная добавка в виде золошлаковой смеси (ЗШС) Апатитской ТЭЦ. Химический состав сырья приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сырьевых материалов

Компоненты	Содержание, мас. %								
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	R <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
МК	93.1	1.0	0.7	0.8	0.9	–	–	1.2	–
ЗШС	53.0	1.2	18.0	14.6	2.5	2.4	0.2	3.5	0.4
АНХ	35.5	4.7	16.6	9.6	9.1	1.2	4.1	14.8	–
КБ	0.1	0.1	0.8	1.0	50.9	0.8	1.0	0.2	43.2
КО	17.1	0.3	2.4	14.8	20.7	22.9	4.5	1.3	14.2

Керамические материалы получали методом полусухого прессования. Предварительно измельченные сырьевые материалы смешивали в соотношениях, указанных в табл. 2. Как известно, чем более мелкодисперсен и гомогенен материал, тем ближе керамический спек к равновесному состоянию. Смесь тщательно гомогенизировали, смачивали до оптимальной влажности и формовали прессованием при удельном давлении 20 МПа. В качестве временной связки для придания прочности сырцу использовали сульфитно-спиртовую барду. После сушки при 100 °С образцы обжигали при температурах 900-1 150 °С с изотермической выдержкой 1 час.

Таблица 2. Составы керамических масс

Компоненты \ Состав	Содержание, мас. %				
	1	2	3	4	5
МК	20	40	60	60	40
АНХ	40	30	20	30	30
КО	40	30	20	10	–
КБ	–	–	–	–	30

Полученные указанным способом керамические материалы были испытаны по стандартным методикам. Образцы испытывали на прочность при сжатии, определяли среднюю плотность, пористость, усадку. Для некоторых образцов определяли предел прочности при изгибе, водопоглощение и морозостойкость.

На рис. 1 представлены результаты испытаний на прочность при сжатии и зависимость огневой усадки образцов керамики от температуры обжига.

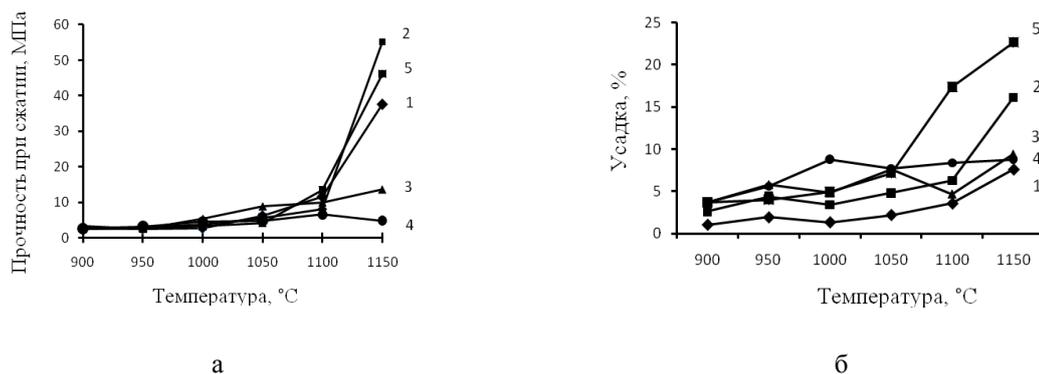


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии (а) и усадки (б) керамических материалов от температуры

Как видно из представленных данных, максимальную прочность при сжатии одного из основных показателей для строительной керамики имеют образцы, обожженные в диапазоне температур 1100-1150 °C. Наилучший результат по данному показателю у образцов составов № 2 и № 5. Однако обожженные керамические массы состава № 5 имеют высокие показатели огневой усадки, предположительно, из-за разложения карбонатов, в большом количестве содержащихся в карбонатите. Поэтому дальнейшие исследования продолжали с керамическими материалами состава мас. %: микрокремнезем – 40, апатито-нефелиновые отходы – 30, хвосты обогащения апатито-магнетитовых руд – 30.

Образцы этого состава показали высокую прочность на изгиб: 9.31 МПа (при температуре обжига 1100 °C) и 32.65 МПа (при температуре обжига 1150 °C) при водопоглощении 9.18 % (температура обжига 1150 °C). По полученным характеристикам материал соответствует требованиям ГОСТ 530-2007 "Кирпич и камни керамические. Технические условия" и ГОСТ 13996-93 "Плитки керамические фасадные и ковры из них. Технические условия". Морозостойкость материала, обожженного при температуре 1150 °C, соответствует марке F50.

Рентгенографические исследования обожженных материалов при температуре 1100-1150 °C выявили наличие волластонита, псевдволластонита и кристобалита, о чем свидетельствуют эффекты, представленные на рентгенограммах (рис. 2).

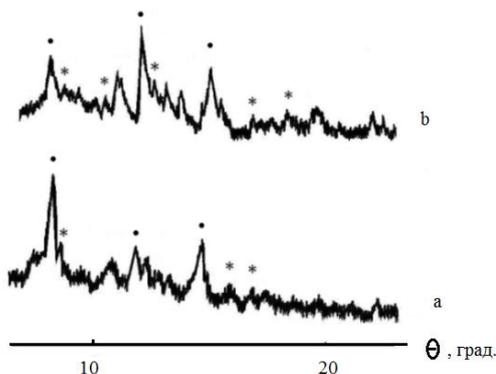


Рис. 2. Рентгенограммы обожженных материалов: а) 1100 °C, б) 1150 °C.

\* – волластонит, псевдволластонит  
• – кристобалит

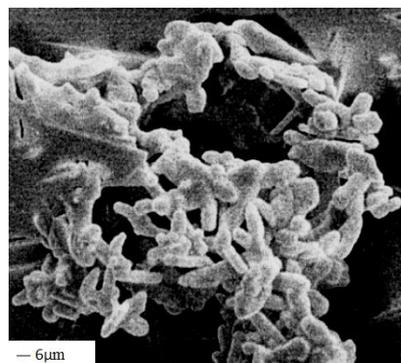


Рис. 3. Микрографический снимок волластонита

Микрографические исследования образцов, представленные на рис. 3, подтверждают образование волластонита, который кристаллизуется в виде призм, пластинок и игольчатых образований, характерных для данного минерала. Игольчатая форма зерна волластонита определяет основное направление его использования в качестве микроармирующего элемента в керамических смесях при получении композиционных материалов с различными матрицами.

Известно, что введение в составы масс алюмосиликатов приводит к снижению огневой усадки материала. Аналогичное действие оказывает и варьирование крупности сырьевых материалов,

обеспечивающее оптимальную упаковку частиц и сочетание размеров пор. В связи с этим было проведено исследование влияния содержания золошлаковой смеси и гранулометрического состава керамических масс на прочностные характеристики и усадку изделий. ЗШС вводили в количестве 2.5-7.5 мас.%. Управление гранулометрическим составом проводили путем замены измельченной до  $-0.1$  мм фракции апатито-нефелиновых хвостов отходами крупностью 2-0.1 мм. Содержание крупной фракции АНХ составляло 10, 15, 20 мас.%.

Анализ полученных результатов показывает, что введение ЗШС в массы позволяет снизить температуру обжига на 40-80 °С при сохранении высоких значений прочностных показателей. Однако величина огневой усадки остается на прежнем уровне. Варьирование гранулометрическим составом АНХ заметного улучшения исследуемых характеристик не показало.

### 3. Получение гранулированных пеносиликатов

Получение гранулированных пеносиликатов, которые могут использоваться в качестве теплоизоляционных засыпок, пористых наполнителей композиционных материалов, основывалось на результатах современных разработок теплоизоляционных материалов на основе жидкостекольных композиций (Кудяков и др., 2005; 2006а; 2006б, Тихомирова, Скорина, 2008). Стекловидные массы, получаемые из гидратированного растворимого стекла путем его нагревания, имеют низкую плотность и соответственно малую теплопроводность. Исходным сырьем для них служили цеолитсодержащий трепел и отходы производства кристаллического кремния.

Задачей наших исследований являлось установление возможности и условий получения качественного зернистого пеносиликата на основе местного вторичного сырья, в первую очередь, микрокремнезема (40-60 мас.%), полученного при кислотной переработке нефелина. В качестве компонента жидкостекольной композиции использовался гидроксид натрия, а с целью снижения себестоимости готового продукта и увеличения прочностных характеристик гранул взамен части гидроксида натрия вводились апатито-нефелиновые отходы (до 10 мас.% от количества щелочи). В качестве модифицирующей добавки использовали ЗШС (до 20 мас.%). Зернистый пористый материал получали методом приготовления жидкостекольной композиции, гранулирования и последующей термообработки гранул.

Проведенные исследования показали перспективность применения техногенного сырья для получения гранулированных пеносиликатов теплоизоляционного назначения (Суворова, Манакова, 2012). Технические характеристики гранулята: насыпная плотность 0.17-0.20 г/см<sup>3</sup>; средняя плотность 0.24-0.33 г/см<sup>3</sup>; объем межзерновых пустот 44 %; пористость 85.8 %; коэффициент теплопроводности в засыпке 0.075-0.08 Вт/м·К; водопоглощение 11.97 %; прочность при сдавливании в цилиндре 0.8-1.3 МПа; морозостойкость (потери массы после 15 циклов) 5 мас.%. Полученные результаты технологических испытаний показывают, что пористый зернистый материал соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к материалам и изделиям строительным теплоизоляционным.

### 4. Разработка композитов на основе волластонитсодержащей керамической матрицы и гранулированных пористых наполнителей

Исследования по получению композиционных материалов проводили с керамической массой состава № 2, мас.%: МК – 40, АНХ – 30, КХ – 30. В качестве наполнителя использовали вспученные гранулы из сланцев полуострова Рыбачий фракции  $-5$  мм (Суворова и др., 2010) и гранулы на основе микрокремнезема двух фракций: 0-1 и 1-5 мм. Количество гранул составляло 15, 20, 25 мас.% от состава керамической массы.

Из указанной смеси готовили образцы: цилиндры диаметром и высотой 22 мм, плиточки  $50 \times 50 \times (6.5-7.5)$  мм, а для определения коэффициента теплопроводности – изделия диаметром 100 мм и высотой 17-19 мм. При получении композиционных материалов применяли прессование при удельном давлении 5-15 МПа с последующим спеканием при температуре 1000-1150 °С. С целью улучшения сцепления гранул с компонентами шихты и спекаемости материала использовали мелкодисперсные отходы медно-никелевых руд (МНХ). Результаты исследований приведены в табл. 3.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение количества пористого наполнителя в составе композита приводит к снижению его прочностных характеристик, а уменьшение крупности гранул, наоборот, увеличивает этот показатель. Более высокую прочность имеют образцы композитов с наполнителем из пористого зернистого материала, полученного на основе микрокремнезема. Вероятно, этот факт можно объяснить лучшим сцеплением гранул и керамической матрицей. Зерна из сланцев имеют оплавленную поверхность. К недостаткам полученных композиционных материалов можно отнести высокие значения водопоглощения, которые характерны для подобных высокопористых систем на основе микрокремнезема в результате преобладания в структуре материала открытых сообщающихся пор.

Таблица 3. Технические характеристики композитов на основе керамической матрицы и пористых наполнителей из 1 – аморфного кремнезема, 2 – сланцев

Содержание компонентов, мас.%						Температура обжига, °С	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Усадка, %	Предел прочности, МПа		Водопоглощение, %
МК	АНХ	КО	МНХ	1	2					при сжатии	при изгибе	
40	30	30	-	-	20	1 000	1.14	55.1	1.3	2.49	0.28	41.4
				-	25	1 100	1.07	58.6	6.27	5.46	4.18	36.6
				-	20	1 000	1.15	54.0	0.90	2.87	0.31	42.0
				-	25	1 100	1.18	54.6	7.50	4.71	4.33	36.3
				-	20	1 000	1.19	58.0	1.8	5.49	3.55	37.6
-	25	1 000	1.17	58.0	1.79	4.7	4.41	36.3				
40	25	25	10	-	15	1 000	1.08	56.8	0.9	2.50	0.22	34.4
				-	20	1 100	1.40	45.9	9.45	13.59	2.50	48.5
				-	25	1 000	1.10	56.0	0.90	2.50	0.22	48.2
				-	20	1 100	1.26	51.5	7.20	8.85	2.51	34.2
				-	25	1 000	1.00	60.0	0.90	2.37	0.21	47.1
-	20	1 100	1.32	49.0	7.65	9.54	4.81	36.5				

Коэффициент теплопроводности композитов на основе керамической силикатной матрицы с пористым наполнителем из вспучивающихся сланцев – 0.165 Вт/(м·К). Эти значения удовлетворяют требованиям ГОСТ 16381-77 "Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация и общие технические требования". Однако коэффициент теплопроводности композита с наполнителем из пористого зернистого материала, полученного на основе микрокремнезема, незначительно превышает эти требования (0.185 Вт/(м·К)).

## 5. Заключение

В результате проведенных исследований установлена возможность получения керамической волластонитсодержащей матрицы, пористого наполнителя и композиционных материалов на основе кремнеземсодержащего продукта кислотной переработки нефелина. Определены составы и установлены режимы обжига керамических масс.

Полученный пористый зернистый материал соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к материалам и изделиям строительным теплоизоляционным, и может быть рекомендован для использования в качестве сыпучего теплоизоляционного стенового материала, утеплителя чердачных перекрытий и кровель.

Показана возможность получения теплоизоляционных композиционных материалов на основе керамической матрицы и пористых наполнителей при температуре обжига 1 000-1 100 °С. Перспективным является использование наполнителя в количестве 15-20 мас. %.

Работа выполнена в рамках Программы ОХНМ РАН "Создание новых металлических, керамических, стекло-, полимерных и композиционных материалов".

## Литература

- Адылов Г.Т., Воронов Г.В., Горностаева С.А. и др. Волластонит Койташского месторождения в производстве керамики и огнеупоров. Огнеупоры и техническая керамика. 2002. № 11. С. 41-43.
- Демиденко Н.И., Конкина Е.С. Спекание керамических масс на основе природного волластонита. Стекло и керамика. 2003. № 1. С. 15-16.
- Кудяков А.И., Радина Т.Н., Иванов М.Ю. Зернистый теплоизоляционный материал на основе жидкого стекла из микрокремнезема и золы-уноса. Строительные ведомости. 2006б. № 2(32). С. 19-21.
- Кудяков А.И., Радина Т.Н., Иванов М.Ю. Сырьевая смесь и способ получения гранулированного теплоизоляционного материала. Пат. 2264363 РФ, МПК<sup>7</sup> C04B 28/26 / Братский гос. технический ун-т. №2004109730/03; заявл. 30.03.04; опубл. 20.11.05, Бюл. № 32.

- Кудяков А.И., Радина Т.Н., Иванов М.Ю.** Сырьевая смесь и способ получения гранулированного теплоизоляционного материала. Пат. 2267468 РФ, МПК С04В 28/26, С04В 18/14, С04В 24/08, С04В 111/20 (2006.01) / Братский гос. технический ун-т. № 2004109731/03; заявл. 30.03.04; опубл. 10.01.06а, Бюл. № 01.
- Кудяков А.И., Радина Т.Н., Свергунова Н.А.** Технология получения легкого материала на основе микрокремнезема. Строительные материалы. 2002. № 10. С. 34.
- Никонова Н.С., Тихомирова И.Н., Беляков А.В., Захаров А.И.** Волластонит в силикатных матрицах. Стекло и керамика. 2003. № 10. С. 38-40.
- Пак А.А., Сухорукова Р.Н.** Способ изготовления композиционного строительного изделия. Пат. 2472615 РФ, МПК В28В 1/50 (2006.01) / Ин-т химии и технологии редких элементов и минер. сырья КНЦ РАН. № 2011131612/03; заявл. 27.07.11; опубл. 20.01.13, Бюл. № 2.
- Салтевская Л.М., Ливсон З.А., Рыщенко М.И., Левитский В.К.** Синтез волластонита и его применение в керамических массах. Стекло и керамика. 1974. № 2. С. 22-24.
- Суворова О.В., Манакова Н.К.** Теплоизоляционный материал на основе кремнеземсодержащих отходов переработки рудного сырья Кольского полуострова. ЖПХ. 2012. Т. 85, № 11. С. 1741-1745.
- Суворова О.В., Мотина А.В., Беляевский А.Т.** Получение пористых теплоизоляционных материалов на основе промышленных отходов переработки минерального сырья Кольского полуострова // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады X Всерос. науч.-практ. конф. Бийск, БТИ АлтГТУ, 2010. С. 57-60.
- Тихомирова И.Н., Скорина Т.В.** Теплоизоляционные материалы на основе кремнеземсодержащего сырья. Строительные материалы. 2008. № 10. С. 58-60.

## References

- Adylov G.T., Voronov G.V., Gornostaeva S.A. i dr.** Vollastonit Koytashskogo mestorozhdeniya v proizvodstve keramiki i ogneporov [Wollastonite of the Koytashskogo field in the production of ceramics and refractories]. Ogneupory i tehnikeskaya keramika. 2002. N 11. P. 41-43.
- Demidenko N.I., Konkina E.S.** Spekanie keramicheskikh mass na osnove prirodnogo vollastonita [Sintering of ceramics on the basis of natural wollastonite]. Steklo i keramika. 2003. N 1. P. 15-16.
- Kudyakov A.I., Radina T.N., Ivanov M.Yu.** Zernisty teploizolyatsionnyi material na osnove zhidkogo stekla iz mikrokremsnezema i zoly-unosa [Granular insulating material based on liquid glass of microsilica and fly ash]. Stroitelnye vedomosti. 2006b. N 2(32). P. 19-21.
- Kudyakov A.I., Radina T.N., Ivanov M.Yu.** Syrevaya smes i sposob polucheniya granulirovannogo teploizolyatsionnogo materiala [Raw mixture and method for producing a granulated insulating material]. Pat. 2264363 RF, MPK7 C04B 28/26 / Bratskiy gos. tehnikeskii un-t. N2004109730/03; yayavl. 30.03.04; opubl. 20.11.05, Byul. N 32.
- Kudyakov A.I., Radina T.N., Ivanov M.Yu.** Syrevaya smes i sposob polucheniya granulirovannogo teploizolyatsionnogo materiala [Raw mixture and method for producing a granulated insulating material]. Pat. 2267468 RF, MPK C04B 28/26, C04B 18/14, C04B 24/08, C04B 111/20 (2006.01) / Bratskiy gos. tehnikeskii un-t. N 2004109731/03; yayavl. 30.03.04; opubl. 10.01.06a, Byul. N 01.
- Kudyakov A.I., Radina T.N., Svergunova N.A.** Tehnologiya polucheniya legkogo materiala na osnove mikrokremsnezema [Technology of light material on the basis of microsilica]. Stroitelnye materialy. 2002. N 10. P. 34.
- Nikonova N.S., Tikhomirova I.N., Belyakov A.V., Zakharov A.I.** Vollastonit v silikatnykh matritsah [Wollastonite in silicate matrices]. Steklo i keramika. 2003. N 10. P. 38-40.
- Pak A.A., Sukhorukova R.N.** Sposob izgotovleniya kompozitsionnogo stroitelnogo izdeliya [A method of manufacturing a composite building product]. Pat. 2472615 RF, MPK B28B 1/50 (2006.01) / In-t himii i tehnologii redkikh elementov i miner. syrya KNTs RAN. N 2011131612/03; yayavl. 27.07.11; opubl. 20.01.13, Byul. N 2.
- Saltevskaaya L.M., Livson Z.A., Ryshchenko M.I., Levitskiy V.K.** Sintez vollastonita i ego primenenie v keramicheskikh massah [Synthesis of wollastonite and its application in ceramic masses]. Steklo i keramika. 1974. N 2. P. 22-24.
- Suvorova O.V., Manakova N.K.** Teploizolyatsionnyi material na osnove kremsnezemsoderzhaschih othodov pererabotki rudnogo syrya Kolskogo poluostrova [Insulating material based on silica-containing mining and processing waste of the Kola Peninsula]. ZhPH. 2012. T. 85, N 11. P. 1741-1745.
- Suvorova O.V., Motina A.V., Belyaevskiy A.T.** Poluchenie poristyh teploizolyatsionnykh materialov na osnove promyshlennykh othodov pererabotki mineralnogo syrya Kolskogo poluostrova [Production of porous insulating materials based on industrial processing wastes on the Kola Peninsula] // Tehnika i tehnologiya

proizvodstva teploizolyatsionnyh materialov iz mineralnogo syrya: Doklady X Vseros. nauch.-prakt. konf. Biysk, VTI AltGTU, 2010. P. 57-60.

**Tikhomirova I.N., Skorina T.V.** Teploizolyatsionnye materialy na osnove kremnezemsoderzhashego syrya [Insulating materials based on silica raw materials]. Stroitelnye materialy. 2008. N 10. P. 58-60.

#### **Информация об авторах**

**Суворова Ольга Васильевна** – Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН (ИХТРЭМС КНЦ РАН), лаборатория минерального сырья и силикатного синтеза, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: suvorova@chemy.kolasc.net.ru

**Suvorova O.V.** – Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials KSC RAS, Laboratory of Mineral Raw Materials and Silicate Synthesis, Cand. of Tech. Sci., Senior Scientific Specialist, e-mail: suvorova@chemy.kolasc.net.ru

**Мотина Анастасия Владимировна** – Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН (ИХТРЭМС КНЦ РАН), ст. инженер, e-mail: manakova@chemy.kolasc.net.ru

**Motina A.V.** – Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials KSC RAS, Senior Engineer, e-mail: manakova@chemy.kolasc.net.ru

**Манакова Надежда Кимовна** – Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН (ИХТРЭМС КНЦ РАН), лаборатория минерального сырья и силикатного синтеза, канд. техн. наук, науч. сотрудник, e-mail: manakova@chemy.kolasc.net.ru

**Manakova N.K.** – Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials KSC RAS, Laboratory of Mineral Raw Materials and Silicate Synthesis, Cand. of Tech. Sci., Scientific Specialist, e-mail: manakova@chemy.kolasc.net.ru