

Физико-химические и технологические аспекты разработки ситаллов нового класса

Анатолий В. Мананков ¹	mav.39@mail.ru
Эльгюл Р. Гасанова ¹	elgyul91@mail.ru
Валентина В. Быкова ¹	qazwsx.0987@mail.ru

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная 2, г. Томск, 634003, Россия

Реферат. Актуальность исследований обусловлена эффективностью освоения полезных ископаемых Заполярья, которая во многом определяется транспортно-производственной инфраструктурой. Суровые природно-климатические условия Крайнего Севера с преобладанием многолетнемерзлых пород значительно влияют на экономику и экологию территории, для которой стоимость строительных материалов и конструкций доходит сейчас до 70% себестоимости нефти и газа. Освоение Ямала, выход на шельфы арктических морей требуют создания инновационных прорывных технологий добычи нефти и газа, включая строительство искусственных островов и подводных сооружений на шельфе. Такие технологии возможны при наличии современных строительных материалов и конструкций, обладающих многократно большей прочностью, долговечностью, износоустойчивостью, кислотоустойчивостью и другими функциональными параметрами самого широкого спектра для промышленного, транспортного и гражданского строительства. Ситаллы, как свидетельствуют результаты анализа научно-технических и патентных данных, относятся к перспективным материалам в области инноваций для авиационной, ракетной и ракетно-космической техники, а также других отраслей экономики, где требуются металлозамещающие, футеровочные и более сложные конструкции материалов с необычным сочетанием свойств: высокой механической, абразивной устойчивостью, высокими диэлектрическими свойствами и химической стойкостью. В статье представлены результаты создания петроситаллов нового класса «Сикамов» (СКС), начиная с метода расчета и оценки состава шихты, основанного на принципах структурной кристаллохимии с учетом выявленных масштабов изовалентного и гетеровалентного изоморфизма в условиях направленной кристаллизации. Метод обеспечивает высокую скорость кристаллизации, достижение необходимой степени структурной и химической однородности и оптимальных физико-химических свойств материала, в котором кристаллическую фазу образуют твердые растворы пироксенов. Упрощается технологический процесс и уменьшается энергопотребление. Объект исследования - минералого-химический состав шихты, особенности несмешиваемости исходных стекол и типы механизмов зародышеобразования, полиморфные модификации цепочечных метасиликатов, их связь с наноструктурой стекла и кинетикой ситализации.

Ключевые слова: петроситаллы, метасиликаты, сикам, мономинеральность, кристаллохимический подход, стехиометрические коэффициенты, горные породы Полярного Урала, свайно-эстакадная дорожная конструкция, транспортная, промышленная гражданская инфраструктура

Physico-chemical and technological aspects of the development of new class sitalls

Anatolii V. Manankov ¹	mav.39@mail.ru
Elgyul R. Gasanova ¹	elgyul91@mail.ru
Valentina V. Bykova ¹	qazwsx.0987@mail.ru

¹ Tomsk State University of Architecture and Building, 634003, Tomsk, pl. Solyanaya 2, Russia

Summary. The relevance of research is due to the efficiency of development of minerals in the Arctic, which is largely determined by the transport and production infrastructure. Harsh climatic conditions of the Far North with a predominance of permafrost rocks (PR) significantly affect the economy and ecology of the territory, for which the cost of construction materials and structures are now reaches 70% of the cost of oil and gas. Mastering Yamal, yield on the shelves of the Arctic seas requires the creation of innovative technology breakthrough of oil and gas, including the construction of artificial islands and underwater constructions offshore. Such technologies are possible in the presence of modern building materials and structures that have many times greater strength, durability, durability, acid resistance and other functional parameters of the widest range for industrial, transport and civil construction. Glass-ceramic, as evidenced by the results of the analysis of scientific, technical and patent data are promising materials in the field of innovation in aviation, rocket and space technology, as well as other industries that require metal-substituting, lining and more sophisticated materials of construction with an unusual combination of properties: high mechanical, abrasive resistance, high dielectric properties and chemical resistance. The article presents the results of the creation of petrositalls of the new "Sikams" class (SCS), beginning with the method for calculating and estimating the composition of the charge, based on the principles of structural crystal chemistry, taking into account the revealed scales of isovalent and heterovalent isomorphism under conditions of directed crystallization. The method provides a high crystallization rate, achieving the required degree of structural and chemical homogeneity and best physico-chemical properties of the material, wherein a crystalline phase to form solid solution of pyroxene. The technological process is simplified and energy consumption is reduced. Object of research - the mineralogical and chemical composition of the charge, particularly glass immiscibility source types and nucleation mechanisms chain metasilicates polymorphs, their relationship to glass and kinetics saturation nanostructure.

Keywords: petrositalls, metasilicates, sikam, monominerality, crystallochemical approach, stoichiometric coefficients, rocks of the Polar Urals, pile-trestle road structure, transport, commercial civil infrastructure

Для цитирования

Мананков А.В., Гасанова Э.Р., Быкова В.В. Физико-химические и технологические аспекты разработки ситаллов нового класса // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 1. С. 211–222. doi:10.20914/2310-1202-2018-1-211-222

For citation

Manankov A.V., Gasanova E.R., Bykova V.V. Physico-chemical and technological aspects of the development of new class sitalls. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 1. pp. 211–222. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-1-211-222

Введение

Недра российского Севера и арктического шельфа хранят 9/10 запасов природного газа, около 2/3 запасов нефти, почти все апатитовые руды, золото, алмазы, включая уникальные импактные сверхпрочные алмазы Папигайской астроблемы, платиноиды и редкоземельные металлы, олово, антрацит Таймыра. Освоение полезных ископаемых происходит в условиях полного бездорожья, и поэтому требует высоких затрат на создание транспортно-производственной и гражданской инфраструктуры. Обустройство Севморпути, создание его сухопутного дублера – Северного широтного хода от Салехарда на Игарку–Хатангу – Тикси, включая строительство плотин как мостовых переходов Игарской ГЭС и Нижне-Ленской ГЭС.

Создание арктической рокадной военно-транспортной инфраструктуры, которая будет обеспечивать стратегическое равновесие за счет использования кратчайшего расстояния подлета из мобильных ракетных поездов до противника через Северный полюс.

Крайне суровые природно-климатические условия Сибири и Заполярья требуют применения высокопрочных и высокоэффективных строительных конструкций самого широкого спектра для промышленного, транспортного и гражданского строительства (рисунок 1). Неотложна потребность в таких высокопрочных строительных конструкциях и дорогостоящая их доставка с «материка», в свою очередь, требует организации их производства на месте использования и из местного сырья, и дешевых местных энергоносителей, для значительного снижения их себестоимости.



Рисунок 1. Дорожные условия: тундра Ямала летом
Figure 1. Road conditions: the tundra of Yamal in the summer

Актуальность создания СКС и конструкций на их основе диктуется расширением масштабов освоения Крайнего Севера, выходом на шельфы арктических морей, невозможность применения традиционных морских буровых платформ. Поэтому, авторами предлагается на смену традиционным стальным железобетонным конструкциям новый материал – петроситалл класса сикам, полностью отвечающий особым

условиям Арктики и с возможностью его производства из местного сырья.

Историческая справка

Ситаллы – новые конструктивные материалы, появились в середине XX в. Для ракетной техники. В связи с развитием науки и техники ситаллы становятся инновационными материалами в самых различных сферах. Существует несколько классификаций ситаллов: по составу исходного сырья (петроситаллы, шлакоситаллы, технические ситаллы), по минеральному составу самих ситаллов (пироксеновые или сикамы, сподуменовые, кордиеритовые, высоко кремнеземистые, свинец содержащие и т. п.), по свойствам ситаллов (износостойкие, кислотостойкие, жаропрочные, а также специальные поглощающие тепловые нейтроны и т. п.) [1–6].

Важным свойством СКС является уникальное сочетание химической, термической стойкости и высокой сопротивляемости механическому истиранию. Это позволяет использовать их в качестве эффективного материала в технологических узлах со специфическими условиями работы. Высокая прочность и сопротивляемость истиранию, огне- и атмосферостойкость, химическая устойчивость делают этот материал долговечным.

Исходное сырье для СКС может быть достаточно различным: 1) магматические горные породы преимущественно с дефицитом в составе кремнезема (ультраосновные, основные интрузивные и эффузивные породы); 2) метаморфические и осадочно-метаморфические горные породы класса силикатов и карбонатов; 3) разнообразные силикатсодержащие промышленные отходы добычи, обогащения и переработки практически любых полезных ископаемых (рудных, нерудных, энергетических каменных углей и т. п.) после извлечения из них дефицитных металлов – от черных и цветных до редких элементов, лантаноидов и актиноидов. По нашим подсчетам в первом приближении, такая стратегия использования минеральных ресурсов позволит сократить на 25% добычу первичных полезных ископаемых [7].

В Томской научной школе минералогии под руководством профессора А.В. Мананкова сотрудниками трех университетов, (НИ ТГУ, НИ ТПУ и ТГАСУ) по результатам фундаментальных исследований в области физической геохимии создан новый класс многофункциональных стеклокристаллических материалов класса сикам и технологии их производства (Свидетельство на товарный знак № 92355) на основе недефицитного природного сырья и промышленных отходов. Появление этих материалов оказалось востребованным многими отраслями

и новой техникой. Важно подчеркнуть, что стала возможной разработка (НИР и ОКР) новых малозатратных и высокоэффективных технологий производства новых конструкций, обладающих особенно высокой прочностью и надежностью в экстремальных природных условиях Арктики.

Исследование нами горных пород золоторудных месторождений Полярного Урала по Программе «Урал Полярный – Урал Промышленный», начатое в 2011 году, Новогоднее–Монто, Петропавловского, Амфиболитового показало, что эти породы основного состава по петрографическому и минералого – геохимическому составу соответствуют требованиям по качеству и объемам для производства петроситалловых дорожных и строительных конструкций [8–11].

Для производства вспененного петроситалла – пеносикама, высокоэффективного теплоизоляционного стенового материала в качестве исходного сырья подходят местные суглинки и пылеватые пески, распространенные по долинам великой сибирской реки Обь и ее многочисленных притоков по всей Западно-Сибирской низменности [12].

Само производство новых строительных материалов и конструкций, обладающих особенно высокой прочностью, обеспечивается разработанной авторами автоматизированной технологией управляемого синтеза фрактальной сферолитовой структуры петроситалла-СКС. Автоматизация управляемого синтеза петроситалла основана на разработке кристаллохимической формулы для расчета состава шихты

на мономинеральный метасиликатный состав с позиции выявленных пределов изоморфизма [7]. Объектами исследования стали полиморфные модификации цепочечных метасиликатов, формирующихся в неравновесных условиях аттрактора кристаллизации – точек бифуркации.

Предметом исследований как более детализированной характеристикой объекта послужили фазовые превращения на стадиях зародышеобразования и роста кристаллов в метасиликатной системе «стекло-кристалл», изучение технологических параметров и их влияния на свойства СКС.

Исходные породы и расчет состава шихт для СКС

Наличие местного природного сырья существенно удешевляет производственные затраты. Это связано с тем, что сырье в удельном весе стоимости петругигической продукции занимает не менее 48% [5, 13, 14]. Вместе с тем, при обустройстве, например, нефтегазовых месторождений и строительстве дорог в условиях многолетнемерзлых пород самая дорогая часть их стоимость приходится на строительные материалы. На один километр дороги III категории стоимость материалов составляет 45 млн руб. [8].

В таблице 1 представлены химические составы исходных пород Полярного Урала из трех месторождений. Авторами выполнены минералого-петрографические, геохимические и экспериментальные исследования этих горных пород с целью получения из них петроситаллов класса СКС.

Таблица 1.

Химический состав базитов Полярного Урала, м %

Table 1.

The chemical composition of the basalts of the Polar Urals, m. %

Оксиды Oxides	1	2	3	4
SiO ₂	48,67	45,08	62,30	57,66
TiO ₂	0,37	0,59	1,05	0,79
Al ₂ O ₃	16,93	14,85	11,98	15,14
Fe ₂ O ₃	5,01	8,54	3,73	2,82
FeO	6,34	7,69	5,51	4,27
MgO + MnO	5,80	7,73	3,05	3,36
CaO	11,84	9,95	5,96	5,11
Na ₂ O	2,00	1,40	1,43	2,93
K ₂ O	0,12	0,17	2,33	2,20
P ₂ O ₅	0,02	0,07	0,12	0,31
H ₂ O	0,28	0,30	0,17	0,38
П.п.п.	2,31	2,74	1,26	4,21
Сумма Sum	99,69	99,11	98,89	99,18

Примечание: 1 – базальт, 2 – основной пикробазальт, 3 – низкощелочной андезит (метаморфизованный базальт), 4 – высокощелочной андезит (амфиболитизированный базальт). Анализы выполнены с помощью масс-спектрального метода с индуктивно связанной плазмой в химико-аналитическом центре «Плазма» (аналитик – исследователь 1 категории А.Н. Маковенко)

Note: 1 – basalt; 2 – basic microbasalt; 3 – low-alkaline andesite (metamorphosed basalt); 4 – high-alkaline andesite (amphibolized basalt). The analyzes were performed with the help of the mass spectral method with inductively coupled plasma in the chemical-analytical center "Plasma" (analyst – researcher of the 1st category A.N. Makovenko)

Результаты химических анализов – основа для теоретического конструирования сырьевых композиций ситаллов по формуле «модуля кислотности СКС» [15, 16]. Для минералов пироксеновой группы расчет ведется на 6 атомов кислорода с учетом пределов изоморфных замещений в трех подрешетках пироксенов M_2 ,

M_1 и R [17]. Полученные мономинеральные метасиликаты с обширным полем изоморфных замещений являются наиболее перспективными, поскольку в структуре стекла возникают когерентные наноструктуры [18–23], которые энергетически связаны друг с другом гармоничными отношениями (таблица 2).

Таблица 2.

Кристаллохимические формулы петроситаллов

Table 2.

Crystallochemical formulas of petrositalls

Проба Sample	Подрешетки формул пироксенов Sublattices in the pyroxene formula		
	M_2	M_1	R
1	$(Ca_{0,86} \cdot Na_{0,13}K_{0,01})$	$(Ca_{0,06}Mg_{0,29} \cdot Fe^{+2}_{0,18} \cdot Fe^{+3}_{0,13} \cdot Al_{0,34})$	$(Si_{1,65} \cdot Ti_{0,01} \cdot Al_{0,34})O_6$
2	$(Ca_{0,9} \cdot Na_{0,09} \cdot K_{0,01})$	$Mg_{0,4} \cdot Fe^{+2}_{0,22} \cdot Fe^{+3}_{0,22} \cdot Al_{0,20}$	$(Si_{1,57} \cdot Ti_{0,02} \cdot Al_{0,41})O_6$
3	$(Ca_{0,83}Na_{0,08}K_{0,09})$	$(Ca_{0,4}Mg_{0,13}Fe^{+2}_{0,13} \cdot Fe^{+3}_{0,08}Al_{0,25})$	$(Si_{1,81}Ti_{0,02}Al_{0,16})O_6$
4	$(Ca_{0,74}Na_{0,18}K_{0,09})$	$(Ca_{0,29}Mg_{0,16}Fe^{+2}_{0,11} \cdot Fe^{+3}_{0,07}Al_{0,38})$	$(Si_{1,79}Ti_{0,02}Al_{0,18}P_{0,01})O_6$

Экспериментальные исследования условий плавления шихт и ситаллизации гомогенных стекол

В соответствии с расчетами были подготовлены исходные шихты. В качестве нуклеаторов кристаллизации основных силикатных фаз использован традиционный для пироксеновых ситаллов оксид хрома. Плавление осуществляли в алуновдвых тиглях в силитовой печи. Оптимальные технологические параметры: температура плавления (1360–1400) °С, время плавления – 1,5–2,0 ч. После закаливания и отжига гомогенные стекла подвергались изучению с помощью различных физико-химических методов

с целью определения температурно-временных технологических параметров ситаллизации.

Образцы стекол с целью определения температурных интервалов зародышеобразования и роста кристаллов исследованы с помощью дифференциально-термического метода (ДТА) на приборе NETZSCH STA 409 PC/PG в интервале 20–1100 °С в лаборатории ЦКП аналитического центра ГПС ТГУ. Получены термограммы с четко выраженными эндоэффектами (T_1), соответствующими температурам образования зародышей основной фазы, и еще более контрастными экзоэффектами (T_2), отвечающими за рост кристаллов (таблица 3).

Таблица 3.

Результаты ДТА стекол на основе базитов Полярного Урала

Table 3.

Results of DTA glasses based on the basilites of the Polar Urals

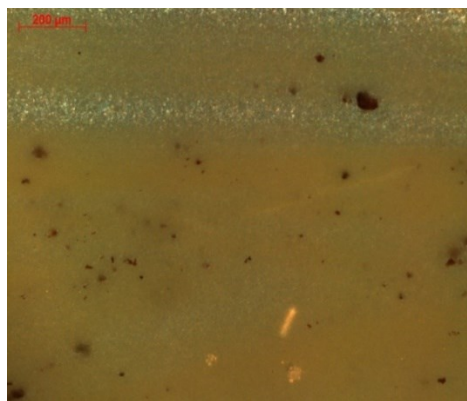
Проба Sample	$T_1, ^\circ C$	$E_1, \text{мВт/мг}$ $E_1, \text{mW/mg}$	$T_2, ^\circ C$	$E_2, \text{мВт/мг}$ $E_2, \text{mW/mg}$
1	723	0,391	905	0,494
2	711	0,423	897	0,812
3	742	0,321	951	0,591
4	727	0,360	964	0,686

Примечание: E_1 – энергия активации зародышеобразования, E_2 – энергия роста кристаллов. (Аналитик – Е.М. Асочакова). Номера 1–4 соответствуют номерам в таблице 2

Note: E_1 is the activation energy for nucleation, and E_2 is the crystal growth energy. (Analyst-EM Asochakova). Numbers 1-4 correspond to the numbers in Table 2

Для каждого состава проведены кинетические эксперименты для выбора временных технологических параметров. Варьировали время изотермического нагрева на ступени T_1 и T_2 , а также скорости нагрева от T_1 до T_2 . Время изотермического нагрева на T_1 варьировали от 15 мин до 75 минут, и на ступени роста кристаллов от 15 до 60 минут. Из продуктов

экспериментов были приготовлены прозрачные и полированные шлифы для изучения структурно-текстурных и физических свойств (рисунок 2). Анализ результатов изучения показал, что оптимальное время изотермического нагрева на ступенях T_1 и T_2 должно быть не менее 45 минут. На шлифах с помощью микроскопа ПМТ-3 проведено определение микротвердости.



(a)



(b)

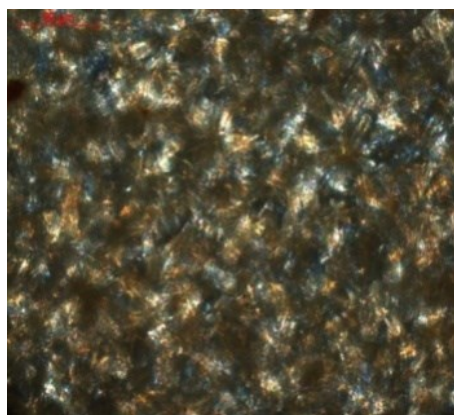
Рисунок 2. Влияние времени изотермического нагрева на ступенях T_1 и T_2 на степень кристаллизации. (a) – 15 мин, (b) – 50 мин

Figure 2. Influence of the time of isothermal heating at stages T_1 and T_2 on the degree of crystallization. (a) – 15 minutes, (b) – 50 minutes

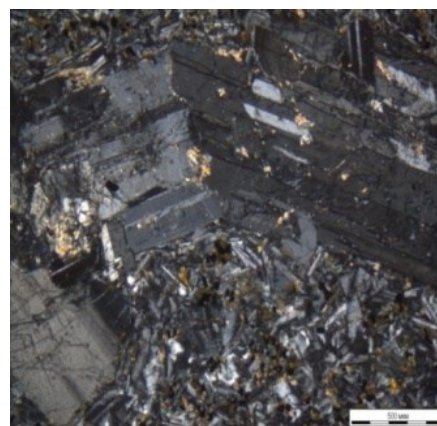
По результатам анализа полученных физико-химических свойств определены оптимальные условия синтеза и технологические параметры. Во-первых, закристаллизованные по оптимальным режимам плитки были правильной геометрической формы, однородной текстуры и цвета, и без видимой деформации. Во-вторых, под микроскопом наноструктура однородная, средний размер кристаллов 5–8 мкм, отсутствуют «порфиновые» образования. Используя оптимальные температурно-временные параметры получены плитки следующих размеров (в мм): 100x50x8, 150x150x15. Из них приготовлены образцы для изучения микроструктуры, физико-химических свойств, а также пробы для рентгенофазового анализа.

Минеральный состав, структуры, текстуры и физико-химические свойства петроситаллов класса СКС

Результаты рентгенофазового анализа (РФА) сопоставлялись с табличными данными АСТМ (CrystallographicaSearch-Match). Получены подтверждения оптимальности исходных составов и технологических параметров [24]. Установлено, что синтезированные петроситаллы отвечают классу сикамов, поскольку они имеют мономинеральный метасиликатный состав. При этом по результатам РФА они соответствуют либо твердому раствору состава моноклинные пироксены – β -волластонит с субмикроструктурными структурами (рисунок 3), либо чистому диопсиду ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), либо твердым растворам моноклинных пироксенов диопсид-геденбергитового ряда (рисунок 4), что и определяет, в конечном счете, их высокие эксплуатационные свойства (таблица 4).



(a)



(b)

Рисунок 3. Сферолитовая субмикроструктура ситалла, получена при оптимальных технологических параметрах (a) в сравнении с исходной горной породой: порфировой структурой с вкраплениями плагиоклаза в микроаллотриоморфной массе габбро-порфирита (b)

Figure 3. Spherulite submicrostructure of the sitall, obtained at optimal technological parameters (a) in comparison with the original rock: porphyry structure with inclusions of plagioclase in the microallotriomorphic mass of gabbro-porphyrite (b)

По физико-химическим свойствам полученные петроситаллы могут найти широкое применение в новой технике, в различных сферах производственных процессов нефтегазовой и других отраслей. Во-первых, уникальное

сочетание высокой износостойкости и химической стойкости делает их эффективными в качестве футеровочного материала для различных трубопроводов, лотков цепных транспортеров, желобов и т. п.

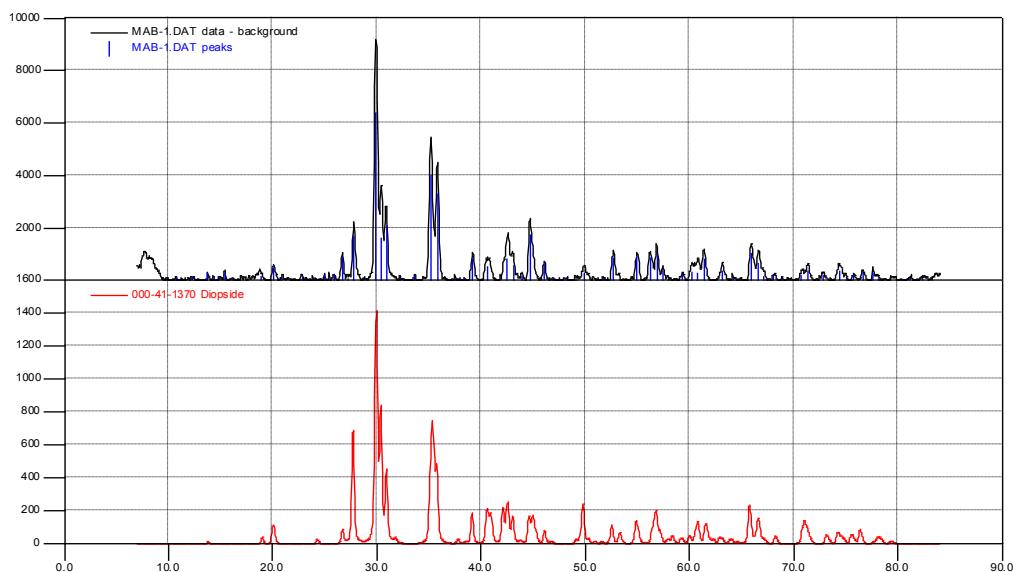


Рисунок 4. Рентгенограмма петроситалла класса СКС, образец № 1 (вверху) и эталонный диопсид № 000-41-1370 (внизу)
Figure 4. X-ray picture of petrositall from sample № 1 (top) and reference diopside №. 000-41-1370 (bottom)

В управлении технологического процесса также важную роль играют знания механизмов и кинетики процесса кристаллизации [25–28]. Это объясняется появлением нового экспериментального материала, который не всегда согласуется с традиционными представлениями, а иногда и вовсе не находят в них объяснения. Такая ситуация возникает при описании высоких скоростей диффузии и роста кристаллов в ситаллах класса сикам (рисунок 5).



Рисунок 5. Субмикроструктуры метастабильного распада на стадии гомогенного зародышеобразования в СКС. Увел. 10000.

Figure 5. Submicrostructures of metastable decay at the stage of homogeneous nucleation in SCS. Magnif. 10000.

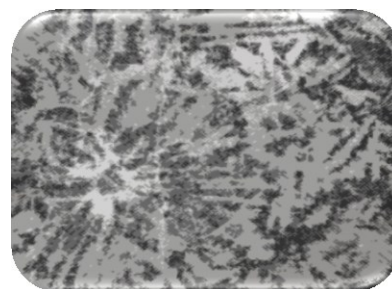


Рисунок 6. Субмикроструктура гетерогенной стадии нуклиации в СКС. Увел. 100.

Figure 6. Submicrostructures of heterogeneous stage nucleation in SCS. Magnif. 100.

Результаты экспериментальных исследований фазовых превращений в системе «стекло–ситалл», позволили нам выявить механизм субсолидусной метастабильной ликвации на стадии зародышеобразования, а на стадии роста полимерных метасиликатных кристаллов гомогенный (рисунок 5) и гетерогенный (рисунок 6) нуклеационные механизмы.

Эти факты хорошо укладываются в концепцию структурной динамики, основанную на наиболее общих законах естествознания – теории колебания и волн, которая прошла инвариантно по всем этапам от классической механики до суперсовременных идей XXI века [23]. Волновые представления, развиваемые нами включают интерференционные эффекты (голографическую модель), применяемые для

любого уровня организации вещества. Голографическая модель позволяет объяснить и прогнозировать процессы образования упорядоченных

структур включая наноструктуры, резонансный характер энергии и массы и ряда других явлений [7, 29].

Таблица 4.

Основные свойства синтезированных петроситаллов класса «сикам», каменного литья и других конструкционных материалов

Table 4.

The main properties of synthesized petrositalls of the class "sikam", stone casting and other construction materials

Показатель (свойство) Indicator (property)	Петроситаллы класса «Сикам» Petrositalls class "Sikam"	Каменное литье* Stone casting *	Бетон * Concrete *	Чугун * Castiron *
Коэффициент линейного расширения (КТР) 107 °C ⁻¹ Indicator (property) Coefficient of linear expansion (CTE) 107 °C ⁻¹	65–114	48–100	100	100
Температура начала размягчения, °C Softening temperature, °C	950–1100	900–1050	–	–
Сопротивление истиранию, г/см ² Abrasion resistance, g/cm ²	0,015–0,04	0,02–0,08	–	–
Предел прочности, МПа: при статическом изгибе Strength limit, MPA: with static bending	100–188	47–80	–	280
Предел прочности, МПа: при сжатии Strength limit, MPA: at compression	707–909	250–500	5–60	800–1000
Хим. стойкость, %: H ₂ SO ₄ NaOH Chem. resistance, %: H ₂ SO ₄ NaOH	94,6–99,9 98,0–99,0	99,8 98,5	– –	– –
Стоимость 1 куб. м. Материалов в рублях The cost of 1 cubic meter of Materials in rubles	9000 На заводе петроситаллов в п. Харп, ЯНАО At the Petrosital Plant in the village of Kharp, YaNAO	30 000	9 000– 24 000 в ЯНАО in YaNAO	112 000

Примечание: * – по данным [2]

Экономическим аспекты проекта

Полученные научные результаты и выполненные НИР по отработке технологии производства метасиликатных ситаллов из местного сырья ЯНАО дают основание перейти в первом приближении к экономическим аспектам (ОКР), связанным с проектированием строительства опытного производства петроситалловых изделий (бордюры, кольца, тротуарные, облицовочные плитки, подшиппники, медицинские имплантаты и др.) и отработки композитных сталепетроситалловых конструкций (балки, колонны, ригеля, плиты, сферические и цилиндрические тубинги, а также множество других конструкций). Особый класс составят сталепетроситалловые конструкции сверхвысокой ударной прочности с дисперсной фиброармированной структурой.

Рассмотрим основные прикладные инженерно-технологические решения и функционально-стоимостную эффективность производства строительных сталепетроситалловых конструкций различной топологии (плоских, цилиндрических и сферических) для монтажа линейных и производственных объектов:

1. Автомобильные сборно-разборные дороги промышленного, военного и гражданского назначения в свайно-эстакадном исполнении, как более дешевые и долговечные.

2. Железные дороги, включая высокоскоростные магистрали ВСМ, в инновационном безбалластном свайно-плитном исполнении.

3. Фундаменты и основания зданий и сооружений промышленного и гражданского исполнения на винтовых криосваях и системой высокоэнергетического геотермального отопления на тепловых насосах.

4. Ограждающие конструкции зданий и сооружений промышленного и гражданского исполнения из пенобетона (вспененный ситалл из суглинков), превосходящие кирпич, пенобетон, сэндвич-панели и другие виды стеновых материалов по тепловым, прочностным и другим технико-экономическим показателям и, в том числе, по главному критерию – низкой себестоимости в 2000 – 3000 руб./куб. Такая себестоимость по сравнению с другими стеновыми материалами не требует привозных компонентов, так как производится из местного минерального сырья в термических печах на местном газе.

5. Сборно-разборные дороги взлетно-посадочные полосы полярных аэродромов и военных авиабаз в Арктике с поверхностью идеальной ровности и большим безремонтным периодом.

6. Грузовые и нефтегазовые морские терминалы, порты и пирсы на арктическом побережье.

7. Искусственные острова и сборно-разборные кусты бурения на болотах, озерах и мелководном шельфе с заморозкой основания промплощадок криосваями.

8. Глубоководные кессонные буровые станции (типа «подводный колокол») смонтированные из сталеситалловых сферических фуллеровых тубингов.

9. Подводные купола из петроситалла для сбора метана в местах интенсивного выброса на шельфе.

10. Трубопроводы, пульпопроводы, водоводы с износостойкой петроситалловой футеровкой с опорой на винтовые криосваи с возможностью более экономичного подогрева труб тепловым насосом. Водоводы с такой футеровкой позволят экспортировать чистую питьевую воду в страны Азии.

11. Подводные стартовые шахтные комплексы из сталеситалловых цилиндрических и сферических тубингов. Как вариант возможно строительство немагнитных подводных аппаратов и лодок для глубин более 1 км.

12. Сталефибропетроситалловые композитные броневые плиты для монтажа на бронетанковую технику и сборно-разборные оборонительные сооружения. При большей ударной прочности композитный сталефибропетроситалл в три раза легче и в сорок раз дешевле новейшей броневой легированной стали.

13. Производство геомодификаторов трения нового поколения на основе волластонита для безразборного ремонта и восстановления трибоузлов в машинах и механизмах. Использование таких геомодификаторов увеличивает срок эксплуатации машин в два-четыре раза.

14. Производство петроситалловых подшипников скольжения с более высокими триботехническими показателями и низкой себестоимостью.

Таким образом, становится возможным строительство взлетно-посадочных полос, искусственных островов-атоллов для морской газонефтедобычи на мелководных участках шельфа, обустройство площадок для нужд нефтегазодобывающих предприятий и других производственных нужд с более высоким (в разы) функциональными показателями качества и меньшей себестоимостью [8].

Отличительной особенностью от традиционной дорожной, железнодорожной или аэродромной конструкции является принцип опирания свайно-эстакадной конструкции как на винтовые сваи, так и на земляную насыпь на плоскость дорожного полотна через демпфирующий и разгрузочный слой из пенополимера или пеноторфосиликатобетона, который принимает на себя колебания, вибрации. В этом случае вся нагрузка самого тяжелого автопоезда, поезда, самолета равномерно распределяется по поверхности грунта. Регулирующее устройство на угольнике винтовой сваи позволяет обеспечивать идеальную ровность рабочей поверхности.

В основе свайно-эстакадной дорожной конструкции лежат два элемента: усиленная дорожно-аэродромно-мостовая плита двух типоразмеров и винтовая криосвая. Использование камнелитых автомобильных, железнодорожных и аэродромных усиленных плит с прочностью на изгиб 33,0 т винтовых криосвай и термосифонов позволяет наморозить основание до максимально низких температур и исключить оттаивание и деформацию оснований в летний период.

Так как расчеты эффективности проводятся за весь период действия инновационных технологий, т. е. 5–10 лет, то все значения показателей будущих периодов дисконтируются к настоящему времени. Коэффициент дисконтирования учитывает банковскую ставку и инфляцию.

Реализация научных результатов может позитивно повлиять на основные показатели деятельности нефтегазодобывающих предприятий за счет:

Увеличения дохода от роста реализации продукции:

- ускорения темпов строительства;
- экономии газа, расходуемого на собственные нужды, и снижения его потерь;

Снижения материальных и энергетических затрат за счет:

- использования нового оборудования, новых технологий и технологических процессов;

- инноваций, направленных на снижение расхода материальных ресурсов;

- использования импортозамещающих и завозимых из других регионов РФ материалов;

- замены используемых в производстве материалов, сырья или полуфабрикатов более дешевыми;

- оптимизации графиков проведения и методов производства капитального и текущего ремонта;

- уменьшения затрат на капитальный и текущий ремонт объектов инфраструктуры;

- повышения ремонтнопригодности оборудования;

Сокращения затрат живого труда за счет использования нового оборудования, новых технологических процессов.

Разработки, нацеленные на экономию времени:

- увеличения межремонтных периодов;

- повышения уровня интенсификации производства.

Экономии капитальных вложений:

- совершенствования технических, технологических и организационных решений при строительстве зданий, сооружений и объектов;

- увеличения сроков полезного использования машин, оборудования, транспортных средств и других видов основных фондов;

- оптимизации корпоративных программ капитального строительства;

- использования прогрессивных технико-технологических и организационных решений;

- оптимизации газотранспортных и транспортных потоков.

Факторы, связанные с повышением качества готовой продукции и с изменением цен.

Рассмотрим, что дает повышение качества готовой продукции на примере разработки и внедрения новых видов строительных материалов и конструкций. Разработанные в ТГУ и ТГАСУ технологии производства петроситалла из различных видов местного сырья, местных энергоносителей позволяет последующее изготовление из них композитных петроситалловых конструкций широкого спектра и областей применения. Основой технико-экономического обоснования производства и применения петроситалловых конструкций являются принципы функционально-стоимостного анализа и управления качеством с выходом на интегральный показатель «цена-качество».

Цель инновации – снижение цены и повышение качества конструкции транспортной инфраструктуры. В ЯНАО «цена» – сметная стоимость 1 км дороги III-й категории Г8

в среднем колеблется (в зависимости от конкретных условий трассы) в пределах 80 – 150 млн. руб. с традиционными низкими показателями «качества».

«Качество» дороги III-й категории с твердым покрытием, как сводный показатель, включает такие основные показатели, как: гарантийный срок безремонтного периода 1–3 года, динамическая грузоподъемность (колесная нагрузка на автомобильную ось) не более 10 тонн, максимальная скорость движения – 90 км/час, ровность поверхности практически не регламентируется (просадки, выбоины, келейность и вспучения асфальтового покрытия – это известный всем водителям атрибут российских дорог I-й и IV-й категории). Все эти показатели резкого снижения качества дорожной одежды на северных и полярных дорогах, ускоряются под воздействием морозного пучения зимой и просадки летом.

В нашем варианте строительства транспортной инфраструктуры с применением петроситалловых дорожных плит появляются дополнительные показатели качества нового материала – петроситалла: температура начала размягчения ($^{\circ}\text{C}$), сопротивление истиранию (г/см^2), прочность при изгибе и сжатии (в МПа), химическая стойкость (в %) к кислотам и щелочам (H_2SO_4 , NaOH) и другие показатели (таблица 1).

Расчет стоимости 1 куб. метра петроситалла при массовом производстве взят, исходя из технико-экономических параметров таких традиционных материалов и конструкций, как стеклокристаллические материалы, близкие по технологическим параметрам.

Структура себестоимости 1 куб. метра петроситалла при массовом производстве включает в себя: сырье и материалы – 40%, зарплата – 30%, энергия – 14%, амортизация – 8%, прочие расходы – 8%.

В случае размещения завода по производству петроситалла в п. Харп ЯНАО, стоимость природного газа – 3 тыс. руб./тыс. куб. м или 50 долл. за тысячу кубов. Расход газа на тепловые процессы около 400 куб. м на производство одного кубометра петроситалла или 1200 рублей. Исходя из удельных затрат на энергетику, примерная себестоимость одного кубометра петроситалла будет равна 8570 рублей.

Из этого следует, что петроситаллы по прочности на изгиб и сжатие сравнимы с чугуном, но, в тоже время, легче по весу в три раза, совсем не подвержены коррозии и самое главное, – дешевле в 12 раз.

Заключение

В ходе исследования возможности получения петроситаллов из отвальных пород базитового и др. состава трех золоторудных месторождений Полярного Урала были получены следующие результаты:

- теоретически рассчитанные и экспериментально уточненные составы и технологические параметры процесса кристаллизации пироксеновых твердых растворов для получения качественных конструктивных материалов СКС;
- исследование физико-химических свойств полученных петроситаллов показало, что они соответствуют ожидаемым результатам и отвечают требованиям современной промышленности;

ЛИТЕРАТУРА

1 Саркисов П.Д., Орлова Л.А., Попович Н.В., Щеголева Н.Е. и др. Современное состояние вопроса в области технологии и производства ситаллов на основе алюмосиликатных систем. Стеклообразование, кристаллизация и формообразование при получении стронций-анортитовых и целезиановых ситаллов // Все материалы. 2011. № 8. С. 1–19.

2 Жунина Л.А., Кузьменков М.И., Яглов В.Н. Пироксеновые ситаллы. Минск: Изд-во БГУ, 1974. 224 с.

3 Павлушкин Н.М. Основы технологии ситаллов. М.: Стройиздат, 1979. 359 с.

4 Стрнад З. Стеклокристаллические материалы. М.: Стройиздат, 1988. 256 с.

5 Артамонова М.В. и др. Химическая технология стекла и ситаллов: М.: Стройиздат, 1983. 432 с.

6 Lőcsei B. Molten Silicates and their Properties/ Budapest: Academia Kiado, 1970. 135 p.

7 Мананков А.В. Физико-химические основы наноструктурной минералогии в получении современных материалов // Вестник ТГАСУ. 2012. № 2. С. 120–136

8 Мананков А.В., Бычков Д.А., Страхов Б.С., Яковлев В.М. и др. Минералого-геохимические и экспериментальные исследования синтеза петроситаллов. // Сборник «Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Азии». Томск: Изд-во Том.ун-та, 2012. С. 10–18.

9 Бычков Д.А., Мананков А.В. Страхов Б.С. Минералогические и петро-геохимические исследования горного сырья Полярного Урала для производства петроситаллов. // Материалы I всероссийской молодежной конференции «Россия в Арктике». 2012. С. 42–43.

10 Гасанова Э.Р., Мананков А.В. К решению проблем бездорожья при добыче полезных ископаемых в особых условиях. // Материалы 63-ей Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых (УНТК-2017). 2017. С. 64–66.

11 Гасанова Э.Р., Мананков А.В. Петроситалловые строительные конструкции для обеспечения нефте-газодобычи в особых условиях Арктики. // Материалы первого рязанского международного Экологического форума «Здоровая окружающая среда – основа безопасности регионов». РГУ имени С.А. Есенина. 2017. С. 124–136.

12 Мананков А.В., Карауш С.А. Разработка высокорентабельной технологии производства пористых остеклованных блоков // Матер. сб. «Научно – инновационная деятельность Томского государственного архитектурно-строительного университета в 2014 г.» 2015. С. 126–127

• предложенное технологическое решение может частично решить проблему утилизации отходов горнодобывающей отрасли;

• на текущий момент методологию получения новых петроситаллов класса сикам можно считать полностью опробованной в лабораторных условиях и готовой к заводским испытаниям;

• петроситалловые и пеносикамовые конструкции в виде свай, плит, блоков, тубингов и купольных сборных элементов в несколько раз дешевле, прочнее и долговечнее, чем из бетона и металла.

13 Rumi M. Kh., Nurmatov Sh. R., Mansurova E.P., Zufarov M.A. et al. Materials for boiler pipes surface protection // Glass and ceramic. 2017. № 5. P. 29–33.

14 Schindler M., Berti D., Hochella M.F. Previously unknown mineral-nanomineral relationships with important environmental consequences: The case of chromium release from dissolving silicate minerals // American Mineralogist. 2017. № 102 (10). P. 2142–2145. doi: 10.2138/am-2017-6170.

15 Manankov A.V., Vladimirov V.M., Strakhov B.S. Mechanism for structure formation and non-equilibrium glass crystallisation model (a review) // Glass and ceramic. 2015. № 1. P. 3–10. doi: 10.1007/s10717-015-9710-x.

16 Manankov A.V., Vladimirov V.M. On the mechanism and thermodynamic modeling of metasilicate-glassceramics crystallization // Glass and ceramic. 2016. № 6. P. 3–7. doi: 10.1007/s10717-016-9856-1

17 Дир У.А. и др. Породообразующие минералы: В 5 томах. М.: Мир, 1966. 236 с.

18 Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. New York: W.H. Freeman and Company, 1982. 464 p.

19 Пинскер Г.З. Об одном важном свойстве ближнего порядка в стеклах // Физика и химия стекла. 1979. Т. 5. С. 509–516.

20 Vigouroux H., Fargin E., Fargues A., Garrec B.L. et al. Crystallization and second harmonic generation of lithium niobium silicate glass ceramics // Journal of the American Ceramic Society. 2011. V. 94 № 7. P. 2080–2086. doi: 10.1111/j. 1551-2916.2011.04416.x

21 Романов Б.М., Мананков А.В., Сазонов А.М. О фазовых и структурных соотношениях в системе энстатит-диопсид при атмосферном давлении // Геология и геофизика. 1981. № 10. С. 67–76.

22 Мананков А.В., Владимиров В.М., Страхов Б.С. Высокопрочные петроситалловые конструкции для работы в особых условиях Арктики // Журнал «Вестник ТГУ». 2014. № 385. С. 223–232

23 Loctyushin A.A., Manankov A.V. Mineral structure in holographic model of substance // Структура и эволюция минерального мира. 1997. С. 35–37.

24 Medvedev E.F., Minko N.I. Silicate glasses permeability to hydrogen // Glass and ceramic. 2017. № 1. P. 3–6.

25 Min'ko N.I., Dobrinskaya O.A., Gridyakin K.N., Bulgakov A.S. Systematic approach to secondary products implementation in glass-making // Glass and ceramic. 2017. № 5. P. 3–6.

26 Stookey J.D. Catalyzed crystallization of glass in theory and practices //Glasstechn. 1959. 32 p.

27 Barbieri L., Ferrari A.M., Lancellotti I., Leonelli C. Crystallization of (Na₂O–MgO) – CaO–Al₂O₃–SiO₂ Glassy Systems Formulated from Waste Products // Journal of the American Ceramic Society. 2000. V. 83. № 10. P. 2515–2520.

28 Vigouroux H., Fargin E., Fargues A., Garrec B.L. et al. Crystallization and second harmonic generation of lithium niobium silicate glass ceramics // Journal of the American Ceramic Society. 2011. V. 94. № 7. P. 2080–2086. doi: 10.1111/j.1551-2916.2011.04416.x

29 Голоденко Б.А., Голоденко А.Б. Методы квантовой химии и нанотехнологий в исследовании энергетических состояний аморфных тетраэдрических структур // Вестник ВГУИТ. 2013. № 1. С. 78–83.

REFERENCES

1 Sarkisov PD, Orlova LA, Popovich NV, Schegoleva NE et al. The current state of the matter in the field of technology and production of glass-based aluminosilicate systems. Glass formation, crystallization and shaping in the production of strontium-anorthite and celstann steel satellites. *Vse materialy* [All materials] 2011. no. 8. pp. 1–19. (in Russian)

2 Zhunina LA, Kuzmenkov MI, Yaglov VN Piroksenovye sitally [Pyroxene Sital] Minsk, Publishing House of the Belarusian State University, 1974. 224 p. (in Russian)

3 Pavlushkin N.M. Osnovy tekhnologii [Fundamentals of technology of steel] Moscow, Stroiizdat, 1979. 359 p. (in Russian)

4 Strnad Z. Steklokristallicheskie [Glass crystalline material] Moscow: Stroiizdat, 1988. 256 p. (in Russian)

5 Artamonova M.V. Khimicheskaya tekhnologiya [Chemical technology of glass and glassware] Moscow, Stroiizdat, 1983. 432 p. (in Russian)

6 Lőcsei B. Molten Silicates and their Properties. Budapest, Academia Kiado, 1970. 135 p.

7 Manankov A.V. Physicochemical foundations of nanostructured mineralogy in obtaining modern materials. *Vestnik TGASU* [Proceedings of TSASU] 2012, no. 2. pp. 120–136 (in Russian)

8 Manankov AV, Bychkov DA, Strakhov BS, Yakovlev VM et al. Mineralogical and geochemical and experimental studies of the synthesis of petrositals. Mineralogiya, geokhimiya i poleznye iskopaemye [Collection "Mineralogy, geochemistry and minerals of Asia] 2012. pp. 10–18. (in Russian)

9 Bychkov DA, Manankov AV, Strakhov BS Mineralogical and petro-geochemical studies of the mountain raw material of the Polar Urals for the production of petrositals. Rossiya v Arktike [Materials of the All-Russian Youth Conference "Russia in the Arctic"] 2012. pp. 42–43. (in Russian)

10 Gasanova E.R., Manankov A.V. To the solution of off-road problems in the extraction of minerals in special conditions. UNTK-2017 [Materials of the 63rd University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists (CNTK-2017)] 2017. pp. 64–66. (in Russian)

11 Gasanova ER, Manankov A.V. Petrosital building structures for oil and gas production in special Arctic conditions. Zdorovaya okruzhayushchaya sreda [Materials of the first Ryazan International Environmental Forum "Healthy Environment – the Basis for Regional Security"] 2017. pp. 124–136. (in Russian)

12 Manankov AV, Karaush S.A. Development of a highly profitable technology for the production of porous vitrified blocks. Nauchno-innovatsionnaya deyatel'nost' TGASU [Mater. proc. "Scientific and innovative activity of the Tomsk State. architect-builds. University in 2014"] 2015. pp. 126–127 (in Russian)

13 Rumi M. Kh., Nurmatov Sh. R., Mansurova E.P., Zufarov M.A. et al. Materials for boiler pipes surface protection. Glass and ceramic. 2017. no. 5. pp. 29–33.

14 Schindler M., Berti D., Hochella M.F. Previously unknown mineral-nanomineral relationships with important environmental consequences: The case of chromium release from dissolving silicate minerals. American Mineralogist. 2017. no. 102 (10). pp. 2142–2145. doi: 10.2138/am-2017-6170.

15 Manankov A.V., Vladimirov V.M., Strakhov B.S. Mechanism for structure formation and non-equilibrium glass crystallisation model (a review). Glass and ceramic. 2015. no. 1. pp. 3–10. doi: 10.1007/s10717-015-9710-x.

16 Manankov A.V., Vladimirov V.M. On the mechanism and thermodynamic modeling of metasilicate glass ceramics crystallization. Glass and ceramic. 2016. no. 6. pp. 3–7. doi: 10.1007/s10717-016-9856-1

17 Dir W.A. et al. Porodoobrazuyushchie mineraly [Pore-forming minerals] Moscow, Mir, 1966. 236 p. (in Russian)

18 Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. New York, W.H. Freeman and Company, 1982. 464 p.

19 Pinsker G.Z. On an important property of short-range order in glasses. *Fizika i khimiya stekla* [Physics and Chemistry of Glass] 1979. pp. 509–516. (in Russian)

20 Vigouroux H., Fargin E., Fargues A., Garrec BL et al. Crystallization and second harmonic generation of lithium niobium silicate glass ceramics. Journal of the American Ceramic Society. 2011. vol. 94. no. 7. pp. 2080–2086. doi: 10.1111 / j. 1551-2916.2011.04416.x

21 Romanov BM, Manankov AV, Sazonov AM About phase and structural relations in the system of enstatite-diopside at atmospheric pressure. Geologiya i geofizika [Geology and geophysics] 1981. no. 10. pp. 67–76. (in Russian)

22 Manankov AV, Vladimirov VM, Strakhov B.S. High-strength petrosital structures for work in special Arctic conditions. *Vestnik TGU* [Journal of the TSU Bulletin] 2014. no. 385. pp. 223–232 (in Russian)

23 Loctyushin A.A., Manankov A.V. Mineral structure in holographic model of substance. Structure And Evolution of the Material World. 1997. pp. 35–37. (in Russian)

24 Medvedev E.F., Min'ko N.I. Silicate glasses permeability to hydrogen. Glass and ceramic. 2017. no. 1. pp. 3–6.

25 Min'ko N.I., Dobrinskaya O.A., Gridyakin K.N., Bulgakov A.S. Systematic approach to secondary products implementation in glass-making. Glass and ceramic. 2017. no. 5. pp. 3–6.

26 Stookey J.D. Catalyzed crystallization of glass in theory and practices. Glasstechn. 1959. 32 p.

27 Barbieri L., Ferrari A.M., Lancellotti I., Leonelli C. Crystallization of (Na₂O–MgO) – CaO–Al₂O₃–SiO₂ Glassy Systems Formulated from Waste Products. Journal of the American Ceramic Society. 2000. vol. 83. no. 10. pp. 2515–2520.

28 Vigouroux H., Fargin E., Fargues A., Garrec B.L. et al. Crystallization and second harmonic generation of lithium niobium silicate glass ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011. vol. 94. no 7. pp. 2080-2086. doi: 10.1111/j.1551-2916.2011.04416.x

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий В. Мананков д.г.-м.н., профессор, кафедра охрана труда и окружающей среды, Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная 2, Томск, 634003, Россия, mav.39@mail.ru

Эльгюль Р. Гасанова аспирант, кафедра охрана труда и окружающей среды, Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная 2, Томск, 634003, Россия, elgyul91@mail.ru

Валентина В. Быкова к.г.-м. н., доцент, кафедра охрана труда и окружающей среды, Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная 2, Томск, 634003, Россия, qazwsx.0987@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 17.01.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 15.02.2018

29 Golodenko B.A., Golodenko A.B. Methods of quantum chemistry and nanotechnology as applied to the study of the energy states of amorphous tetrahedral structures. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies]. 2013. no. 1. pp. 78–83. (in Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anatolii V. Manankov Dr. Sci. (Geol.-Min.), professor, occupational safety and environment department, Tomsk State University of Architecture and Construction, Solyanaya sq., 2, Tomsk, 634003, Russia, mav.39@mail.ru

Elgyul R. Gasanova graduate student, labour and environment protection, department, Tomsk State University of Architecture and Construction, Solyanaya sq., 2, Tomsk, 634003, Russia, elgyul91@mail.ru

Valentina V. Bykova Cand. Sci. (Geol.-Min.), associate professor, labor and environment protection department, Tomsk State University of Architecture and Construction, Solyanaya sq., 2, Tomsk, 634003, Russia, qazwsx.0987@mail.ru

CONTRIBUTION

All authors equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 1.17.2018

ACCEPTED 2.15.2018