

УДК 553.04:666.9-127

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕОЛИТОВ ЯКУТИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Иванов Константин Сергеевич,
sillicium@bk.ru

Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

Актуальность исследования связана с вовлечением цеолитовой породы месторождения Хонгуруу (Якутия) в производство теплоизоляционного материала, благодаря чему решается проблема обеспечения региональной строительной отрасли крупнотоннажным сырьевым ресурсом.

Цель: исследование возможности применения местного сырьевого ресурса Якутии для производства гранулированной пеностеклокерамики и исследование её свойств.

Объекты: пробы цеолитовой породы месторождения Хонгуруу, лабораторные образцы гранулированной пеностеклокерамики.

Методы. Химико-минералогический состав цеолитовой породы исследовался с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра BrukerS2 Ranger (Германия) и дифрактометра ДРОН-6 (Россия). В исследованиях применялась макросъёмка цифровой фотокамерой. Основные свойства образцов исследованы в соответствии со стандартными методиками: ГОСТ 9758-2012 и ГОСТ 7076-99.

Результаты. Основными породообразующими минералами исследованной породы являются цеолиты типа клиноптилолита и гейландита, что предопределяет её высокую реакционную способность к взаимодействию со щелочами. Применение экструзионного метода синтеза пеностеклокерамики способствует интенсификации реакции образования гидратированных щелочных силикатов и снижению расхода гидроксида натрия в 1,8 раза. Из цеолитовой породы получены образцы гранулированного теплоизоляционного материала фракции 10–20 мм. Насыпная плотность составляет 220 кг/м³, прочность при сжатии в цилиндре – 1,5 МПа, эффективная теплопроводность слоя материала – 0,078 Вт/(м·°C) и объёмное водопоглощение – 6,2 %. Нормативные требования допускают применение полученного материала для строительства дорог в сложных геокриологических условиях Якутии. Предложенный метод синтеза является перспективным с точки зрения обеспечения строительства транспортных магистралей гранулированным теплоизоляционным материалом из местных цеолитовых пород. Учёт колоссальной протяжённости территории Якутии, наибольший экономический эффект при строительстве дорог может быть достигнут путём создания мобильных комплексов по производству теплоизоляционного материала вблизи объектов строительства.

Ключевые слова:

Природный цеолит, клиноптилолит, теплоизоляционный материал, пеностеклокерамика, дорожное строительство.

Введение

Промышленное освоение Арктической зоны России, учитывая её колоссальную протяжённость, немыслимо без создания новой и совершенствования существующей транспортной инфраструктуры. В этой связи развитие и локализация производств инновационных строительных материалов, ориентированных на региональную сырьевую базу, является актуальной задачей [1].

На сегодняшний день в мировой и отечественной практике при строительстве автомобильных и железных дорог в условиях распространения вечной мерзлоты широко применяются плиты из экструзионного пенополистирола [2, 3]. Благодаря низкой теплопроводности, порядка 0,035 Вт/(м·K), применение теплоизоляционных слоёв из этих плит способствует сохранению грунтов оснований в мёрзлом состоянии. Однако низкая средняя плотность плит (35–40 кг/м³) и дальность их транспортировки, которая может превышать 2 тыс. км, приводит к высоким логистическим издержкам и кратному увеличению стоимости материала на месте строительства. В связи с климатическими и экономико-географическими особенностями создание региональных производств теплоизоляционных материалов является актуальной задачей.

Арктическая зона России обладает сырьевым потенциалом для получения экологически чистых и высокопрочных теплоизоляционных материалов. Например, одна из наиболее перспективных в плане обеспечения портов Северного морского пути стабильным грузопотоком Ямало-Ненецкая опорная зона освоения Арктики обладает крупнейшими в стране запасами опал-кристаллитовых пород с ресурсным потенциалом свыше 300 трлн м³ [4]. Согласно публикациям последних лет, эти породы являются перспективным сырьём для получения пеностеклокерамики. Этот теплоизоляционный материал обладает необходимой прочностью для его укладки в основании сооружений. Но самое главное – благодаря закрытопористой структуре материал имеет низкое водопоглощение и сохраняет свои теплоизоляционные свойства в увлажнённом состоянии [5–7].

Другой важнейшей территорией освоения Арктики является Северо-Якутская опорная зона Республики Саха, где находится одна из ключевых точек Северного морского пути – порт Тикси [1]. Промышленное освоение этой территории потребует модернизации существующей и создания современной транспортной системы. Учитывая протяжённость Якутии, для строительства автомобильных и железнодорожных транспортных магистралей потребуются сотни

тысяч кубических метров теплоизоляционных материалов.

В этой связи наиболее перспективным местным сырьевым ресурсом для их производства могут стать цеолитовые породы. Прогнозные ресурсы Кемпедийского цеолитоносного района западной Якутии насчитывают около 3,5 млрд т [8]. Например, утверждённые и пригодные для открытой разработки запасы одного из месторождений цеолитоносного района – Хонгуруу, насчитывают 11 млн т. Отечественная и зарубежная литература последних лет свидетельствует о возможности получения на основе цеолитовых пород широкой номенклатуры строительных материалов [9–17].

Особую значимость, как было сказано выше, имеют современные методы синтеза теплоизоляционной пеностеклокерамики из цеолитов [10, 11]. Однако анализ литературных источников не позволяет сделать заключение о полной исчерпанности проблемы производства пеностеклокерамики из местных цеолитовых пород. Отметим основные аргументы в этой связи:

1. Существует необходимость целевого исследования и обоснования пригодности образцов цеолитовых пород западной Якутии для получения теплоизоляционного материала.
2. Свойства материала должны соответствовать как суровым климатическим условиям Якутии, так и особенностям технологии его применения при возведении автомобильных и железных дорог. Таким образом, возрастают требования к прочности, водопоглощению и теплопроводности материала.
3. В связи с необходимостью применения для синтеза материала такого дорогостоящего компонента как гидроксид натрия (каустик), требуются технологические приёмы, позволяющие снизить его содержание в сырьевой смеси до 10 % и менее.
4. Несмотря на множество различных способов синтеза, изложенных в научной литературе, на сегодняшний день отсутствует единая технология производства пеностеклокерамики, позволяющая масштабировать промышленное производство. Приоритетным в этом плане может стать создание мобильных производственных установок для непрерывного обеспечения материалом протяжённых участков строительства транспортных магистралей.

В настоящее время основной предпосылкой для успешного решения рассматриваемой проблемы является разработанный в ИКЗ ТюмНЦ СО РАН (г. Тюмень, Россия) экструзионный метод синтеза гранулированной пеностеклокерамики. Основой метода является процесс непрерывного приготовления, перемешивания и грануляции сырьевой смеси путём её продавливания шнеком сквозь калиброванные отверстия гранулирующей решётки. Среди существующих методов экструзионный метод наиболее прост с точки зрения практической реализации, а также более эффективен экономически, т. к. позволяет существенно сократить содержание гидроксида натрия в сырьевой смеси.

На основе экструзионного метода разработана технология гранулированной пеностеклокерамики с применением диатомитов и диатомовых глин Новоуренгойской площади [18–20]. Результатом промышленной апробации новой технологии с применением сырья месторождений, имеющих участки выхода пород вблизи транспортных магистралей, послужило строительство опытно-экспериментальных участков автомобильных дорог. Благодаря накопленному положительному опыту экспериментального применения материала, в 2017 г. был разработан нормативный документ, регламентирующий его применение в дорожном строительстве на вечномёрзлых грунтах [21].

В отличие от плит из экструзионного пенополистирола, гранулированная пеностеклокерамика обладает дренажными функциями, сохраняя при том свои теплоизоляционные свойства. В этой связи полученный материал был применён для теплоизоляции водоотводных железобетонных конструкций на участке пути Забайкальской железной дороги (район станции Ерофей Павлович) [22]. Благодаря этому было исключено замерзание дренажных вод и обеспечено бесперебойное функционирование водоотводных сооружений пути.

Учитывая накопленный научно-производственный опыт получения и практический опыт применения гранулированной пеностеклокерамики, экструзионный метод можно считать одним из наиболее перспективных направлений промышленной переработки цеолитовых пород Якутии. В этой связи цель работы состояла в исследовании особенностей синтеза гранулированной пеностеклокерамики из цеолитовых пород Якутии экструзионным методом, а также в обосновании применения материала в дорожном строительстве.

Методика исследования

Пробы цеолитовой породы были отобраны с действующего карьера месторождения Хонгуруу, расположенного в 22 км к югу от пос. Кемпедий Сунтарского улуса. В настоящее время на месторождении различают цеолитовые породы клиноптилолит-гейландитового и гейландитового составов с различным содержанием катионов Ca, Na и K [8]. На большей части месторождения распространён первый тип сырья.

Химический состав породы был исследован с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра BrukerS2 Ranger (Германия). Минералогический состав проб исследовался с применением дифрактометра ДРОН-6 (Россия).

В общем случае суть синтеза пеностеклокерамики сводится к смешиванию измельчённых в порошок кремнезёмсодержащих пород с раствором щёлочи, с образованием гидратированных щелочных силикатов на первом этапе. На втором этапе происходит вспенивание смеси при температуре 750–900 °С в результате образования расплава и дегидратации новообразований – силикатов. Полученная силикатная «пена» содержит стекловидную и кристаллическую фазу минеральной части кремнезёмсодержащей породы, которая не вступает в реакцию со щёлочью.

Для получения образцов пеностеклокерамики цеолитовая порода высушивалась и измельчалась в дробилке до размера не более 5 мм. Затем с помощью вибрационной мельницы из породы приготавливали порошок с размером частиц не более 0,16 мм. Молотая порода смешивалась с раствором гидроксида натрия (NaOH) с концентрацией 40 %. Полученная смесь содержала 10 % NaOH в пересчёте на сухое вещество. При более низком содержании щелочного компонента теплоизоляционные свойства пеностеклокерамики ухудшаются за счёт низкой вспениваемости смеси. Увеличение содержания щелочного компонента приводит к удорожанию материала.

Смесь в виде пресс-порошка за счёт продавливания шнеком сквозь отверстия гранулирующей решётки превращалась в тугопластичную гранулированную массу. Для этой цели применялся экструдер, схематичный вид которого и фотография общего вида представлены на рис. 1.

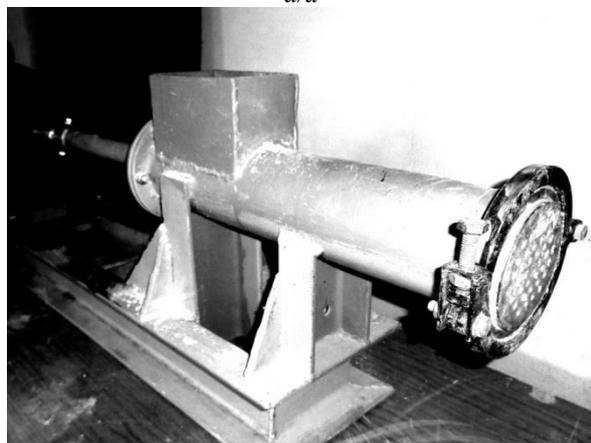
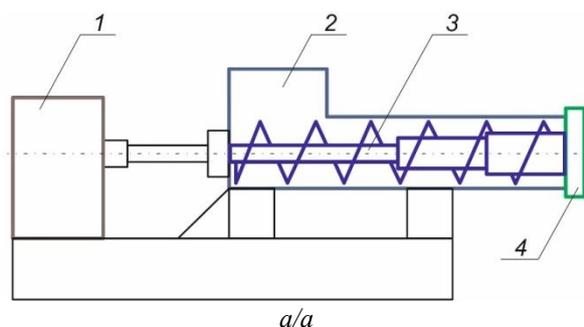


Рис. 1. Лабораторный экструдер в разрезе (а) и общий вид (б): 1 – механизм электропривода; 2 – загрузочное отверстие; 3 – шнек; 4 – гранулирующая решётка

Fig. 1. Cross sectional (a) general view (b) of laboratory extruder: 1 – electric drive mechanism; 2 – loading pit; 3 – auger; 4 – granulating mesh

Шнек имел диаметр, равный шагу его витка, который составлял 80 мм. Необходимое для продавливания смеси усилие обеспечивалось электроприводом с крутящим моментом 490 Н·м, развиваемым при частоте вращения шнека 45 мин⁻¹. Механизованная обработка смеси в экструдере сочетает в себе несколько процессов:

- 1) дополнительная гомогенизация смеси;
- 2) интенсификация химического процесса образования силикатов;
- 3) грануляция смеси с получением полуфабриката диаметром 5 мм и длиной 5–12 мм (размеры зависят от диаметра отверстий в гранулирующей решётке).

Результаты и обсуждение

Химический состав проб, отобранных с поверхности карьера, имел следующие усреднённые значения, мас. %: SiO₂ – 66,2, Al₂O₃ – 13,1, Fe₂O₃ – 1,0, MgO – 0,8, CaO – 1,4, Na₂O – 3,6, K₂O – 1,2, TiO₂ – 0,2, потери при прокаливании – 12,5. Внешний вид цеолитовой породы показан на рис. 2.



Рис. 2. Цеолитовая порода месторождения Хонгурру (масштаб клетки 1 см)

Fig. 2. Zeolite-bearing rock of the Khonguru deposit (scale of a square is 1 cm)

Полуфабрикат высушивался при 80 °С, после чего для дальнейшего обжига гранулы помещались на керамическую подложку в один слой.

Обжиг гранул проводился в муфельной печи при 800 °С в течение 20 мин. Основные качественные характеристики образцов гранулированной пеностеклокерамики: насыпная плотность, прочность при сжатии в цилиндре, водопоглощение и теплопроводность определялись в соответствии со стандартными методами [23, 24].

Дифрактограмма цеолитовой породы представлена на рис. 3. Основной минеральной составляющей цеолитовой породы являются клиноптилолит и гейландит, которые имеют схожие рефлексы в диапазоне углов 9–30°. Остальные фазы с содержанием не более 20 % были идентифицированы как кварц, полевошпатовый минерал альбит и иллит (гидрослюда). По химико-минералогическому составу исследованные пробы относятся к клиноптилолит-гейландитовому типу сырья, получившему название хонгурин [8].

Высокое содержание кремнезёма (66,2 %) и цеолитов (около 80 %) характеризует породу как потенциально пригодную для синтеза пеностеклокерамики в силу пористого строения и высокой реакционной способности цеолитов. Как отмечалось выше, процесс

а также характерный стеклянный блеск, соответствующий высокому содержанию стеклофазы. Зеленоватая окраска, местами переходящая в чёрную, объясняется оплавлением наружной поверхности гранул при обжиге, что способствует созданию восстановительной среды внутри гранулы. В результате восстановления Fe_2O_3 образуются закисные формы железа, дающие окраску.

Благодаря преимущественно закрытопористой стекловидной структуре гранулы обладают сравнительно низким водопоглощением по объёму, которое составляет 6,2 %. Например, для керамзитового гравия это значение превышает 20 %. Высокое водопоглощение материала существенно снижает его теплоизоляционные функции, приводя к резкому увеличению эффективной теплопроводности. В этой связи строительство дорог в сложных геокриологических условиях требует применения теплоизоляционных материалов с минимальным водопоглощением.

Полученные результаты можно сравнить с данными других авторов [10, 11], синтезировавших из цеолитовых пород гранулированную пеностеклокерамику с насыпной плотностью 125 кг/м^3 и теплопроводностью $0,045 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$. В настоящих исследованиях получены более высокие экспериментальные значения насыпной плотности и теплопроводности: 220 кг/м^3 и $0,078 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ соответственно.

Однако необходимо отметить, что синтез пеностеклокерамики из цеолитовой породы с применением экструзионного метода имеет следующие преимущества:

1. Механизированное воздействие шнека на сырьевую смесь способствует интенсификации образования гидратированных щелочных силикатов, что позволяет снизить содержание NaOH в 1,8 раза и существенно удешевить материал.
2. Процессы смешивания и силикатообразования и грануляции сырьевой смеси совмещаются в одной операции, что упрощает технологию.
3. В отличие от результатов других авторов, гранулированная пеностеклокерамика из цеолитовой породы месторождения Хонгуруу имеет прочность при сжатии в цилиндре 1,5 МПа и объёмное водопоглощение 6,2 %, благодаря чему, согласно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнова О.О., Липина С.А., Кудряшева Е.В. Формирование опорных зон в Арктике: методология и практика // Арктика и Север. – 2016. – № 25. – С. 148–157.
2. Thermal regime analysis and protective measure evaluation for wide embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau / T. Ma, T. Tang, X. Ding, X. Huang, Y. Zhao // International Journal of Civil Engineering. – 2018. – V. 16 (10). – P. 1303–1316.
3. Esch D.C. Long-term evaluations of insulated roads and airfields in Alaska // Transportation Research Record. – 1995. – V. 1481. – P. 56–62.
4. Нестеров И.И., Генералов П.П., Подсосова Л.Л. Западно-Сибирская провинция кремнисто-опаловых пород // Советская геология. – 1984. – № 3. – С. 3–10.
5. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, L.V. Klimova, L.A. Yatsenko // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2020. – V. 142. – P. 119–127.

нормативным требованиям [21], допускается применение полученного теплоизоляционного материала в дорожном строительстве.

Выводы

1. Химико-минералогический состав цеолитовой породы месторождения Хонгуруу в основном представлен кремнезёмом и цеолитами типа клиноптилолита и гейландита, что свидетельствует о высокой реакционной способности породы к образованию гидратированных щелочных силикатов при взаимодействии со щёлочью.
2. Нормативные требования допускают применение полученного гранулированного теплоизоляционного материала, имеющего прочность при 1,5 МПа, эффективную теплопроводность $0,078 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ и объёмное водопоглощение 6,2 % для строительства дорог в сложных геокриологических условиях Якутии.
3. По сравнению с существующими методами синтеза пеностеклокерамики, применение экструзионного метода позволило снизить содержание NaOH в исходной смеси в 1,8 раза, что даёт существенный экономический эффект.
4. Предлагаемый простой и экономичный экструзионный метод является базой для создания мобильных производственных комплексов, позволяющих непрерывно обеспечивать строящиеся дороги Якутии востребованным теплоизоляционным материалом, что существенно сократит транспортные издержки. Технология переработки цеолитовых пород с применением серийно выпускаемого оборудования включает дробление, сушку, помол сырья, двухстадийную грануляцию в шнековом экструдере, сушку полуфабриката с последующим вспениванием в барабанной печи обжига. В зависимости от условий производства разработаны сушильные и печные агрегаты, работающие на различном топливе: уголь, мазут, газоконденсатное и дизельное топливо.

Работа выполнена в рамках темы госзадания: рег. № НИОКТР АААА-А17-117051850061-9. Исследования частично финансировались АНО «Губернская Академия», г. Тюмень.

6. Goltsman B.M., Yatsenko L.A., Goltsman N.S. Production of foam glass materials from silicate raw materials by hydrate mechanism // Solid State Phenomena. – 2020. – V. 299. – P. 293–298.
7. Biostable silicic rock-based glass ceramic foams / V.T. Erofeev, A.I. Rodin, A.S. Kravchuk, S.V. Kaznacheev, E.A. Zaharova // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – V. 84 (8). – P. 48–56.
8. Колодезников К.Е. Цеолитосные провинции востока Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 2003. – 204 с.
9. Овчаренко Г.И. Цеолиты в строительных материалах. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 320 с.
10. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks // Ceramics International. – 2016. – V. 42 (16). – P. 19250–19256.
11. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Chemical processes during energy-saving preparation of lightweight ceramics // Journal of the American Ceramic Society. – 2014. – V. 97 (6). – P. 1743–1749.
12. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: Study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix / R.C. Da Silva, E.T. Kubaski, E.T. Tenório-Neto, M.K. Lima-Tenório,

- S.M. Tebcherani // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2019. – V. 511. – P. 177–182.
13. Zeolitic tuffs as raw materials for lightweight aggregates / R. De’Gennaro, P. Cappelletti, G. Cerri, M. De’Gennaro, M. Dondi, A. Langella // Applied Clay Science. – 2004. – V. 25 (1–2). – P. 71–81.
 14. Use of zeolite-rich rocks and waste materials for the production of structural lightweight concretes / R. De’Gennaro, A. Langella, M. D’Amore, M. Dondi, A. Colella, P. Cappelletti, M. De’Gennaro // Applied Clay Science. – 2008. – V. 41 (1–2). – P. 61–72.
 15. Colella C., De’Gennaro M., Aiello R. Use of zeolitic tuff in the building industry // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2001. – V. 45. – P. 551–587.
 16. Properties of lightweight concrete blocks with waste zeolitic tuff / I. Tekin, T. Kotan, A.T. Osmanson, W. Brostow, O. Gencel // Medziagotyra. – 2020. – V. 26 (4). – P. 463–470.
 17. Volland S., Brötz J. Lightweight aggregates produced from sand sludge and zeolitic rocks // Construction and Building Materials. – 2015. – V. 85. – P. 22–29.
 18. Диатомиты Ямала в технологии строительных материалов для Арктических условий / К.С. Иванов, А.А. Мельникова, Е.А. Коротков, П.В. Смирнов // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 1. – С. 18–23.
 19. Смирнов П.В., Иванов К.С. Ресурсный потенциал р. Томчару-Яха на диатомитовое сырьё // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2015. – № 2. – С. 97–103.
 20. Ivanov K.S. Influence of the methods of preparing a silicate-sodium mixture on the formation of the structure of foam glass ceramics // Glass Physics and Chemistry. – 2019. – V. 45 (1). – P. 60–65.
 21. СП 313.1325800.2017. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. – М.: Стандартинформ, 2018. – 74 с.
 22. Утепление железобетонных конструкций для пропуска дренажных вод на Забайкальской дороге / В.П. Мельников, Е.А. Коротков, К.С. Иванов, Е.В. Шехтман, З.Б. Дашинимаев, Н.П. Сигачев, Я.М. Клочков // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 7. – С. 13–15.
 23. ГОСТ 9758-2012. Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 84 с.
 24. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – М.: Стандартинформ, 2000. – 24 с.

Поступила 15.07.2021 г.

Информация об авторах

Иванов К.С., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН.

UDC 553.04: 666.9-127

APPLICATION OF ZEOLITES OF YAKUTIA FOR OBTAINING GRANULAR THERMAL INSULATION MATERIAL

Konstantin S. Ivanov,
sillicium@bk.ru

Institute of the Earth's Cryosphere of Tyumen Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
86, Malygin avenue, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance of the study is related to the involvement of the zeolite-bearing rock of the Khonguruu deposit (Yakutia) into production of heat insulation material, which solves the problem of providing the regional construction industry with a large-tonnage raw material resource.

The main goal of the research is to study the possibility of using the local raw material base of Yakutia for production of granular glass-ceramic foam and to study its properties.

Objects: zeolite rock samples from the Honguruu deposit, laboratory samples of granular foam-glass ceramic.

Methods. Chemical and mineralogical composition of the zeolite-bearing rock was investigated using an energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometer Bruker S2 Ranger (Germany) and a DRON-6 diffractometer (Russia). The research used macro photography with a digital camera. The main properties of the samples were investigated in accordance with the methods of State Standards: 9758-2012 and 7076-99.

Results. The main rock-forming minerals of the studied rock are zeolites such as clinoptilolite and heulandite, which predetermines its high reactivity to interaction with alkalis. The intensification of the formation of hydrated alkaline silicates was achieved due to the use of the extrusion method for synthesis of foam-glass ceramic and consumption of sodium hydroxide was reduced by 1,8 times. Samples of granulated foam-glass ceramic of 10–20 mm fraction with a bulk density of 220 kg/m³, compressive strength in a cylinder of 1,5 MPa, effective thermal conductivity of 0,078 W/(m·°C) and volumetric water absorption of 6,2 % were obtained. The use of the obtained material for road construction in difficult geocryological conditions of Yakutia is allowed by regulatory requirements. The proposed synthesis method is promising from the point of view of ensuring the construction of transport routes with granular heat insulation material from local zeolite-bearing rocks. Taking into account the colossal length of the territory of Yakutia, a significant economic effect in road construction can be achieved through the creation of mobile complexes for production of heat insulation material near construction sites.

Key words:

Natural zeolite, clinoptilolite, insulating materials, glass ceramics, road construction.

The research was carried out within the subject of State Task no NIOKTR AAAA-A17-117051850061-9 and partially financially supported by the ANO «Gubernskaya Akademiya», Tyumen.

REFERENCES

- Smirnova O.O., Lipina S.A., Kudryasheva E.V. Formirovanie opornykh zon v Arktike: metodologiya i praktika [Formation of support zones in the Arctic: methodology and practice]. *Arktika i Sever*, 2016, no. 25, pp. 148–157.
- Ma T., Tang T., Ding X., Huang X., Zhao Y. Thermal regime analysis and protective measure evaluation for wide embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, vol. 16 (10), pp. 1303–1316.
- Esch D.C. Long-term evaluations of insulated roads and airfields in Alaska. *Transportation Research Record*, 1995, vol. 1481, pp. 56–62.
- Nesterov I.I., Generalov P.P., Podsova L.L. *Zapadno-Sibirskaya provintsiiya kremnistoy opalovoykh porod* [West Siberian province of silica-opal rocks]. *Sovetskaya geologiya*, 1984, no. 3, pp. 3–10.
- Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Klimova L.V., Yatsenko L.A. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, vol. 142, pp. 119–127.
- Goltsman B.M., Yatsenko L.A., Goltsman N.S. Production of foam glass materials from silicate raw materials by hydrate mechanism. *Solid State Phenomena*, 2020, vol. 299, pp. 293–298.
- Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Kaznacheev S.V., Zaharova E.A. Biostable silicic rock-based glass ceramic foams. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 84 (8), pp. 48–56.
- Kolodeznikov K.E. *Ceolitonosnyye provintsii vostochnykh Sibirskoy platformy* [Zeolite-bearing provinces in the east of the Siberian platform]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 204 p.
- Ovcharenko G.I. *Tseolity v stroitelnykh materialakh* [Zeolites in building materials]. Barnaul, AltGTU Publ., 2000. 320 p.
- Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks. *Ceramics International*, 2016, vol. 42 (16), pp. 19250–19256.
- Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Chemical processes during energy-saving preparation of lightweight ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, vol. 97 (6), pp. 1743–1749.
- Da Silva R.C., Kubaski E.T., Tenório-Neto E.T., Lima-Tenório M.K., Tebcherani S.M. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, vol. 511, pp. 177–182.
- De'Gennaro R., Cappelletti P., Cerri G., De'Gennaro M., Dondi M., Langella A. Zeolitic tuffs as raw materials for lightweight aggregates. *Applied Clay Science*, 2004, vol. 25 (1–2), pp. 71–81.
- De Gennaro R., Langella A., D'Amore M., Dondi M., Colella A., Cappelletti P., De'Gennaro M. Use of zeolite-rich rocks and waste materials for the production of structural lightweight concretes. *Applied Clay Science*, 2008, vol. 41 (1–2), pp. 61–72.
- Colella C., De Gennaro M., Aiello R. Use of zeolitic tuff in the building industry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2001, vol. 45, pp. 551–587.
- Tekin I., Kotan T., Osmanov A.T., Brostow W., Gencel O., Martinez-Barrera G. Properties of lightweight concrete blocks with waste zeolitic tuff. *Medziagotyra*, 2020, vol. 26 (4), pp. 463–470.
- Volland S., Brötz J. Lightweight aggregates produced from sand sludge and zeolitic rocks. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 85, pp. 22–29.
- Ivanov K.S., Melnikova A.A., Korotkov E.A., Smirnov P.V. [Yamal diatomites in building materials technology for Arctic conditions]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*, 2016, no. 1, pp. 18–23. In Rus.

19. Smirnov P.V., Ivanov K.S. [Resource potential r. Tomcharu-Yaha for diatomite raw materials]. *Geologiya i mineralno-syrevyye resursy Sibiri*, 2015, no. 2, pp. 97–103. In Rus.
20. Ivanov K.S. Influence of the methods of preparing a silicate-sodium mixture on the formation of the structure of foam glass ceramics. *Glass Physics and Chemistry*, 2019, vol. 45 (1), pp. 60–65.
21. SP 313.1325800.2017. *Dorogi avtomobilnye v rayonakh vechnoy merzloty. Pravila proektirovaniya i stroitelstva* [Set of rules 313.1325800.2017. Automobile roads in permafrost regions. Design and construction rules]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 74 p.
22. Melnikov V.P., Korotkov E.A., Ivanov K.S., Shekhtman E.V., Dashinimaev Z.B., Sigachev N.P., Klochkov Ya.M. *Uteplenie zhelezobetonnykh konstruksiy dlya propuska drenazhnykh vod na Zabaykalskoy doroge* [Insulation of reinforced concrete structures for drainage water passage on the Trans-Baikal road]. *Put i putevye khozyaystvo*, 2017, no. 7, pp. 13–15.
23. GOST 9758–2012. *Zapolniteli poristye neorganicheskie dlya stroitelnykh rabot. Metody ispytaniy* [State Standard 9758-2012. Porous inorganic aggregates for construction work. Test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 84 p.
24. GOST 7076-99. *Materialy i izdeliya stroitelnye. Metod opredeleniya teploprovodnosti i termicheskogo soprotivleniya pri stacionarnom teplovom rezhime* [State Standard 7076-99. Building materials and products. Method for determination of thermal conductivity and thermal resistance under stationary thermal conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2000. 24 p.

Received: 15 July 2021.

Information about the authors

Konstantin S. Ivanov, Cand. Sc., senior researcher, Institute of the Earth's Cryosphere of Tyumen Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.