ОБЗОРЫ

УДК 691:699.86

СОВРЕМЕННЫЕ ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ**Колосова А.С., Пикалов Е.С.***ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru*

Теплоизоляционные материалы применяют для строительных ограждающих конструкций, трубопроводов, тепловых агрегатов и холодильных установок, чтобы обеспечить стабильный температурный режим внутри изолируемого объема за счет снижения теплового потока, проходящего через слой теплоизоляции. Для эффективной теплоизоляции необходимо, чтобы применяемый материал обладал не только низкой теплопроводностью, но и низкими значениями плотности и водопоглощения, достаточной прочностью, экологической и пожарной безопасностью, биостойкостью и свойствами, обеспечивающими его преимущества для изоляции различных поверхностей и для разных эксплуатационных условий. В данной работе рассмотрены традиционные и перспективные материалы для строительной и технической теплоизоляции, в состав которых входят преимущественно неорганические компоненты. Приведены общая характеристика, преимущества и недостатки минеральной ваты и изделий из нее, стеклообразные, жидкостекольные, асбестосодержащие и керамические теплоизоляционные материалы и изделия, композиционная теплоизоляция, в которой наполнителями являются природные и техногенные неорганические наполнители. В статье также рассматриваются перспективные на сегодняшний день силикатно-кальциевые плиты и листы, материалы и изделия для аэрогелиевой, вакуумной и отражающей теплоизоляции. Представленная информация позволяет оценить разнообразие и особенности теплоизоляционных материалов и изделий на неорганической основе.

Ключевые слова: теплоизоляционные материалы, энергоэффективность, минеральная вата, пеностекло, асбестосодержащие материалы, легкие бетоны, перлит, вермикулит

MODERN EFFECTIVE THERMAL INSULATION MATERIALS ON INORGANIC BASE**Kolosova A.S., Pikalov E.S.***Federal Educational Institution of Higher Education Vladimir State University of a name of Alexander Grigorevich and Nikolay Grigorevich Stoletovs, Vladimir, e-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru*

Thermal insulation materials are used for building enclosing structures, pipelines, thermal units and refrigeration units to ensure a stable temperature regime inside the insulated volume by reducing the heat flow passing through the insulation layer. For effective thermal insulation, it is necessary that the material used has not only low thermal conductivity, but also low density and water absorption values, sufficient strength, environmental and fire safety, biostability and properties that provide its advantages for insulation of various surfaces and for different operating conditions. In this article, we consider traditional and promising materials for construction and technical thermal insulation, which consist mainly of inorganic components. The General characteristics, advantages and disadvantages of mineral wool and products from it, glass-like, liquid glass, asbestos-containing and ceramic insulating materials, composite insulation in which fillers are natural and technogenic inorganic fillers. The article also considers promising today silicate-calcium plates and sheets, materials and products for aerogelic, vacuum and reflective types of thermal insulation. This information allows you to evaluate the variety and features of thermal insulation materials and products on inorganic base.

Keywords: heat insulating materials, energy efficiency, mineral wool, foam glass, asbestos-containing materials, lightweight concrete, perlite, vermiculite

К теплоизоляционным относятся материалы, которые предназначены для максимально возможного снижения теплового потока, проходящего через них, и для обеспечения стабильного температурного режима внутри изолируемого объема за счет низкого коэффициента теплопроводности. По своему назначению различают строительную теплоизоляцию, применяемую для строительных ограждающих конструкций (стен, перекрытий, перегородок, фундамента и кровли) и техническую теплоизоляцию, называемую также монтажной, применяемую для оборудования, промышленных емкостей и трубопроводов.

Для строительной и технической теплоизоляции применяют множество видов теплоизоляционных материалов, называемых также утеплителями и теплоизоляторами, выбор которых основывается в основном на форме изолируемой поверхности и условиях эксплуатации, к которым относятся климатические условия, температурный режим с обеих сторон от теплоизоляции, наличие влаги и др. В связи с этим наряду с низким коэффициентом теплопроводности и малой теплоемкостью для теплоизоляционных материалов также важны низкая плотность для снижения весовой нагрузки, низкое водопоглощение, паро- и водо-

непроницаемость, которые необходимы из-за того, что при насыщении водой теплотехнические характеристики материала резко снижаются. Немаловажное значение имеют прочность, жесткость, износостойкость, морозостойкость, биостойкость, долговечность, легкость монтажа, экологическая и пожарная безопасность. В зависимости от условий эксплуатации, свойств и стоимости в каждом конкретном случае будет более эффективным тот или иной теплоизоляционный материал.

Целью данной работы является характеристика современных теплоизоляционных материалов, состоящих преимущественно из неорганических компонентов, рассмотрение особенностей, преимуществ и недостатков этих материалов.

Минераловатная теплоизоляция

Данная группа материалов является самой распространенной и широко применяемой как для строительной, так и для технической теплоизоляции. К минераловатным относятся материалы и изделия на основе волокон, получаемых из силикатных расплавов при помощи раздува струи (дутьевой метод), падения струи на вращающийся диск или валки (центробежный способ), пропускания расплава через фильеру или комбинацией этих методов (центробежно-дутьевой и центробежно-фильерно-дутьевой способы). В зависимости от сырьевого материала, из которого получают силикатный расплав, различают следующие виды минеральной ваты (минваты):

- каменная вата, получаемая из осадочных (известняки, доломиты и мергели), магматических (базальты, габбро, диабазы, диориты, граниты, синиты, пегматиты, пемза и вулканические шлаки) и метаморфических (волластониты, амфиболиты) горных пород. Глины, доломиты и известняки также используют как добавки к магматическим породам для повышения текучести расплава. Наиболее распространенной разновидностью каменной ваты является базальтовая, которая выдерживает до 700 °С, а при отсутствии добавок (базальтовое тонкое и супертонкое волокна: БТВ и БСТВ) – до 1114 °С;

- стеклянная вата (стекловата), выдерживающая до 450 °С и получаемая из стекольного боя или из стекольной шихты: смеси из кварцевого песка, доломита, соды, известняка, стекольного боя и в ряде случаев различных добавок;

- шлаковая вата (шлаковата), выдерживающая до 300 °С и выпускаемая из шлаков черной и цветной металлургии;

- каолиновая (муллитокремнеземистая, керамическая, алюмосиликатная, поли-

кристаллическая) вата, выдерживающая до 1150 °С и получаемая из технического глинозема ($Al_2O_3 > 99\%$) и кварцевого песка, иногда с добавлением хромсодержащих соединений или оксида циркония для повышения огнеупорности до 1300 °С;

- кварцевая (кремнеземная) вата, выдерживающая до 1100 °С и получаемая из чистого кварцевого песка с содержанием $SiO_2 = 96-98\%$;

- корундовая (алюмооксидная, алундовая) вата, выдерживающая до 1600 °С и получаемая из технического глинозема.

Минеральная вата может быть получена из смеси перечисленных выше сырьевых материалов, а также с использованием в качестве добавок отходов силикатной и строительной отраслей промышленности, преимущественно боя глиняного (безобжигового), керамического и силикатного кирпичей. Для снижения температуры плавления к сырьевым материалам могут добавляться бор или оксид бора [1, 2].

К минеральной также можно отнести асбестовую вату, которая выдерживает до 500 °С и в отличие от других видов минеральной ваты производится путем распушения тонковолокнистого минерала хризотила (хризотилевоый асбест, хризотил-асбест). В виде самой ваты асбестовая вата практически не используется из-за высокой канцерогенности асбестовой пыли, однако существуют смеси из асбестовой и других ват (асбоминвата).

По теплопроводности разновидности минеральных ват можно расположить в следующей последовательности: базальтовая вата ($\lambda = 0,035-0,039$ Вт/м·°С), стекловата ($\lambda = 0,03-0,052$ Вт/м·°С), шлаковата ($\lambda = 0,046-0,048$ Вт/м·°С), каменная вата ($\lambda = 0,048-0,077$ Вт/м·°С), асбестовая вата ($\lambda = 0,116-0,15$ Вт/м·°С), кремнеземная вата ($\lambda = 0,14$ Вт/м·°С), каолиновая и корундовая ваты ($\lambda = 0,16$ Вт/м·°С). При этом шлаковата характеризуется наименьшими значениями стоимости, плотности и прочности при наибольшем водопоглощении, колкостью волокон, остаточной кислотностью (негативно влияет на металлические конструкции), возможным наличием опасных веществ и радиационного фона. Стекловата характеризуется повышенными упругостью и колкостью волокон. Шлаковата и стекловата также отличаются сравнительно низкой стойкостью к отрицательным температурам: для данных ват температурный минимум составляет -60 °С, а для других минват он равен -190 °С. У каменной ваты наибольшая плотность и достаточно высокая прочность. Каолиновая, кремнеземная и корундовая ваты характеризуются наибольшими значениями

прочности и химической стойкости, что наряду с высокой термостойкостью определяет их использование для заполнения температурных швов и теплоизоляции различных печей, газоходов, дымовых труб и теплогенераторов. Для асбестовой ваты характерна высокая прочность, а для хризотилых волокон характерны невысокая стойкость к кислотам и высокая стойкость к щелочам.

Для всех минеральных ват характерны низкая стоимость, низкая теплопроводность, высокие звуко- и электроизоляционные свойства, негорючесть (позволяет использовать в качестве огнезащиты), термостойкость, химическая и биологическая стойкость. К недостаткам минеральных ват относятся высокое водопоглощение (насыщение водой повышает теплопроводность и создает мостики холода) и хрупкость волокон, поэтому их часто обрабатывают гидрофобными веществами (например, кремнийорганическими соединениями), применяют при обязательной наружной гидроизоляции и облицовке для защиты от внешних повреждений, а также в большинстве случаев используют как полуфабрикат для производства минераловатных изделий или для армирования огнестойкого (огнеупорного) бетона.

Наиболее распространенными минераловатными изделиями являются плиты (минплиты) и рулонные маты, применяемые для строительной и технической теплоизоляции. В зависимости от метода формирования различают три разновидности рулонных матов:

– рулонный минераловатный (минеральный) войлок, получаемый путем пропитки минеральной ваты различными связующими с последующим легким уплотнением. Такие маты иногда называют склеиваемыми;

– прошивные (иглопрошивные) маты, которые, как следует из названия, получают без использования связующих путем прошивки предварительно уплотненного и охлажденного минераловатного ковра при помощи суровой нити (нити повышенной толщины), шпагата, стальной проволоки, стеклянного или базальтового волокна;

– иглопробивные маты, которые получают без использования связующих путем пробивки полотна специальными иглами, совершающими возвратно-поступательные движения для перепутывания волокон.

Для изготовления минплит и рулонных матов из минерального войлока в качестве связующих, добавляемых в количестве от 1,5 до 10 мас. % (до 14–18% для битумных связующих), применяют полимерные вещества (преимущественно фенолофор-

мальдегидные смолы, а также карбамидные смолы, фенолоспирты, латексы, пластифицированные поливинилацетатные эмульсии), составы на основе нефтяных битумов или крахмала, бентонитовые и огнеупорные глины, кремнийорганические соединения, жидкое стекло и глиноземистый цемент. В зависимости от вида и количества связующего различают жесткие и полужесткие плиты, мягкие плиты (листовой войлок) и рулонный войлок.

Эластичность мягких плит и рулонных матов всех трех разновидностей позволяет использовать их для теплоизоляции трубопроводов, а твердость жестких плит облегчает отделочные работы, что позволяет успешно применять их для «мокрых» фасадов и для утепления пола под цементную стяжку. Кроме того, рулонные маты и мягкие плиты применяют для утепления кровли, перекрытий и стен с небольшой несущей нагрузкой, а жесткие плиты – для утепления при более высоких несущих нагрузках. При этом для прошивных и иглопробивных матов характерны отсутствие несущей способности и малая прочность, но у них отсутствует усадка, и они могут применяться для теплоизоляции оборудования и трубопроводов, температурный режим которых не допускает применения полимерных и битумных связующих. Полу-жесткие плиты широко применяются в производстве сэндвич-панелей [3], теплоизоляции оборудования и резервуаров, а также для теплоизоляции в каркасном и малоэтажном строительстве. С ростом жесткости плит повышается их прочность и теплопроводность. Другие свойства плит и матов, в первую очередь термостойкость, а следовательно, и область их применения также напрямую зависят от вида и количества связующего.

Существуют разновидности плит и матов, у которых с одной или двух сторон расположен обкладочный (облицовочный) материал, выполняющий армирующую (металлическая сетка, стеклосетка, стеклоткань, асбестовая ткань), паро-гидроизоляционную (битумированная бумага, пергамин, полиэтиленовая пленка) или отражающую тепловое излучение (алюминиевая фольга) функции. Следует отметить, что маты на основе всех видов минеральной ваты называют теплоизоляционными, а на основе каолиновой, кварцевой и корундовой ват – огнеупорными. Прошивные и иглопробивные маты также называют холстами, полотнами или одеялами, а фольгированные холсты – фольма-холстами. Для технической теплоизоляции также применяют рулонные маты малой ширины, называемые

полосами или лентами (получают путем продольной нарезки матов), и рулонный войлок малой толщины, называемый фетром. В строительстве для утепления криволинейных или «ломаных» поверхностей применяют также минераловатные ламели, получаемые путем нарезки минераловатных плит на бруски. Разновидностью рулонных матов являются ламельные маты, применяемые для технической изоляции и представляющие собой бруски (ламели) из каменной ваты на различных связующих, приклеиваемые к покровному (наружному) слою из алюминиевой фольги, которая в ряде случаев армируется стекловолокном. По мнению авторов данной статьи, теплоизоляционные картон и бумага (например, базальтовый картон, керамическая бумага и т.д.) также относятся к данной группе изделий и по своей сути представляют собой плиты малой толщины (листы).

Наряду с плитами и рулонными матами к минераловатным изделиям относятся:

– Теплоизоляционные (минеральные, гибкие, уплотнительные) шнуры (жгуты) или пух-шнуры (пухшнуры), получаемые без использования связующих путем набивки минеральной ваты в оплетку из металлической проволоки, стеклянных и хлопковых нитей. В случае асбестового шнура и набивка, и оплетка выполняются из асбеста. Шнуры применяют для теплоизоляции трубопроводов, тепловых агрегатов, стыков между панелями и плитами.

– Фасонные изделия: цилиндры, полцилиндры (скорлупы) и сегменты, получаемые по аналогичной с жесткими плитами технологии и представляющие собой специализированную теплоизоляцию для трубопроводов. Существуют фольгированные разновидности данных изделий.

– Теплоизоляционные (огнеупорные) ткани, состоящие из переплетения взаимно перпендикулярных продольных (основа) и поперечных (уток) волокон в виде нитей или жгутов из крученых волокон, которые покрывают полимерным связующим или дополняют волокнами из хлопка, лавсана или вискозы в количестве 5–18%. Существуют фольгированные ткани, называемые фольма-тканями. Ткани применяются как техническая теплоизоляция, прокладочный, огнезащитный и уплотнительный материал в различных отраслях промышленности.

– Гранулированная минеральная вата, получаемая в результате разрыва ваты на клочки или разрезкой минераловатного ковра на мелкие кусочки с последующей окаткой и просеиванием для отделения капель расплава (неволоконистых включений – корольков). Гранулированная вата

применяется для так называемой задувной (надувной, сыпучей, насыпной) теплоизоляции строительных конструкций и оборудования при помощи специализированного компрессорного оборудования или вручную.

В качестве насыпной теплоизоляции также применяется рыхлая (сыпучая, насыпная, задувная, надувная) минеральная вата, представляющая собой обрезь и отбракованные минераловатные плиты или маты, которые измельчают и при наличии синтетического связующего отжигают для повышения экологичности, снижения плотности и теплопроводности. Рыхлая минеральная вата применяется преимущественно для теплоизоляции горизонтальных поверхностей (чердаков, межэтажных перекрытий и полов), в том числе в качестве дополнения к другим видам насыпной теплоизоляции, и позволяет создать максимально ровный слой утеплителя на изолируемой поверхности.

Стеклообразная и жидкостекольная теплоизоляция

Данная группа представляет собой теплоизоляционные материалы и изделия с аморфной (стекловидной) твердой фазой, которые получают с использованием стекла, стеклообразующих минералов или жидкого стекла (силикатный клей, канцелярский клей – водный раствор силикатов натрия $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$, калия $\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ или их смеси) в качестве связующего или для получения наполнителей. Стоит отметить, что к этой группе также можно отнести минераловатные теплоизоляционные материалы на основе стекловаты, рассмотренные выше.

Наиболее распространенным материалом данной группы является ячеистое стекло (пеностекло), получаемое путем спекания тонкоизмельченных стекла, эрклеза (глыбы, образующиеся при дроблении стекломассы, застывшей при аварийной или плановой остановке стекловаренной печи), стекольного боя или некоторых природных минералов (трахиты, сиениты, нефелины, обсидианы, диатомиты, трепелы и др.) с газообразователями (известняк, доломит, антрацит и т.д.). При нагреве до температуры 800–900 °С происходит переход стеклообразователей в пластично-вязкое (пиропластичное) состояние с одновременным разложением газообразователей и вспениванием стекломассы, что позволяет получить мелкопористую ячеистую структуру материала с теплопроводностью 0,04–0,14 Вт/м·°С после охлаждения. Особенностью структуры пеностекла является наличие микропор в межпоровых стенках, поэтому общая по-

ристость материала достигает 80–95%. Пеностекло характеризуется средней для теплоизоляционных материалов прочностью, водостойкостью, низким водопоглощением, негорючестью, термостойкостью (до 300–400 °С для пеностекла на основе обычного стекла и до 1000 °С при отсутствии щелочных оксидов), огнестойкостью, морозостойкостью до -55 °С, отсутствием усадки, химической стойкостью (за исключением щелочей, плавиковой и фтороводородной кислот) и биостойкостью, хорошими электро- и звукоизоляционными свойствами, легкостью механической обработки, экологичностью. Недостатками пеностекла являются хрупкость, сравнительно высокая плотность, низкая паропроницаемость и высокая стоимость. Пеностекло выпускается в форме блоков, фасонных изделий (цилиндров и полуцилиндров) и гранул в виде песка, гравия или щебня. Изделия из пеностекла применяются в качестве строительной и технической теплоизоляции, а гранулированное пеностекло применяется в качестве заполнителя для легких бетонов и насыпной теплоизоляции [4–6].

Практически аналогичными пеностеклу по свойствам и области применения материалами являются кремнепор, выпускаемый в виде штучных изделий, и кремнезит (сиопор), являющийся насыпной теплоизоляцией или заполнителем для легких бетонов с размером частиц до 5 мм. Основой для получения этих материалов является тонкомолотое высококремнеземистое сырье с содержанием $\text{SiO}_2 > 70\text{--}80\%$: природный аморфный кремнезем (трепелы, опоки, диатомиты, туфы, трассы) и магматические породы (базальты, обсидианы, перлиты). В процессе производства высококремнеземистое сырье перемешивается с каустической содой NaOH . При нагреве этой смеси до 250–600 °С происходит формирование гидросиликата натрия $(\text{Na}_2\text{O})_m \cdot (\text{SiO}_2)_n \cdot \text{H}_2\text{O}$ (гидрогеля, кремнегеля) с последующим удалением паров воды, выполняющих роль газообразователя, и образованием вспененного стеклообразного материала [7]. Термостойкость кремнепора и кремнезита составляет 700 °С.

К теплоизоляции на основе жидкого стекла относятся материалы и изделия, которые содержат в своем составе гранулы, получаемые вспучиванием так называемого стеклосилера из жидкого стекла или из силикат-глыбы, образующейся в результате охлаждения расплава силиката натрия или калия, с добавлением тонкомолотых минеральных добавок (известняк, зола, кварцевый песок). При этом гранулы размером более 5 мм называют стеклопором, а грану-

лы размером от 0,1 до 5 мм – силипором. Эти материалы выдерживают температуры от -200 до +660 °С. Стеклопор и силипор используют как наполнители для получения штучной, заливочной и мастичной теплоизоляции. Силипор также применяют для заполнения ячеек в сотопластах (пропитанных реактопластами каркасных структур, состоящих из шестигранных ячеек и изготавливаемых из бумаги, ткани и др. материалов) с получением сотосилипоров. К наиболее распространенным теплоизоляционным материалам для строительной и технической теплоизоляции с этими наполнителями относятся:

– стеклосиликат ($\lambda = 0,05\text{--}0,07 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$), представляющий собой гранулы стеклопора или силипора, омоноличенные связующим, которым является жидкое стекло или его смесь с добавками. Существуют разновидности данного материала: обжиговый стеклосиликат ($\lambda = 0,07\text{--}0,08 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$), для которого проводится вспучивание связующего, и заливочный стеклосиликат ($\lambda = 0,06\text{--}0,08 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$), в котором связующим является самовспенивающаяся композиция на основе жидкого стекла;

– стеклофосфогель ($\lambda = 0,07 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$), являющийся аналогом обжигового стеклосиликата, в котором наполнителем является измельченный стеклопор, а в качестве связующего применяется смесь жидкого стекла и ортофосфорной кислоты;

– стеклоцемент ($\lambda = 0,07\text{--}0,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$), в котором связующим является цементное молоко (смесь с соотношением цемент : вода = 1 : 3–4) на основе быстротвердеющих цементов. Стоит отметить, что существует конструкционный материал с аналогичным названием, представляющий собой смесь цемента и стекловолокна;

– стеклогипс ($\lambda = 0,07\text{--}0,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$), в котором, как следует из названия, в качестве связующего применяются гипсовые и гипсоцементно-пуццолановые вяжущие;

– стеклополимеры ($\lambda = 0,04\text{--}0,05 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$), к которым относятся наполненные стеклопором вспененные полимеры: стеклопенополиуретан, стеклофенопласт, стеклопеночарбаид;

– стеклобитум ($\lambda = 0,045\text{--}0,07 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$), в котором связующими являются нефтяные битумы.

Из жидкостекольных теплоизоляционных материалов наиболее прочными и легкими являются стеклополимеры и стеклосиликаты, наименее прочным при наибольшей плотности – стеклогипс. Также существует пеносиликат, представляющий собой вспененное жидкое стекло с наполнителями (например, базальтовая чешуя с микрокаль-

цитом, аэросилом или каолином) или без них [8, 9] и совпадающий по названию с пеносиликатом, получаемым при вспенивании известковых вяжущих. Пеносиликат на основе жидкого стекла отличается низкими теплопроводностью ($\lambda = 0,03-0,065$ Вт/м $\cdot$ °С) и прочностью. Для всех жидкостекольных материалов характерны среднее водопоглощение и низкая водостойкость (повышается с увеличением силикатного модуля – доли оксида кремния по отношению к доле оксида натрия или калия), поэтому часть из них может применяться при относительной влажности воздуха не более 75%, однако существуют и материалы повышенной водостойкости. Жидкостекольные теплоизоляционные материалы применяются для теплоизоляции строительных конструкций и промышленного оборудования.

Асбестосодержащая теплоизоляция

Данная группа представляет собой материалы и изделия, получаемые с использованием волокон хризотилового асбеста: минераловатные изделия (насыпной асбест, асбестовые вата, войлок, ткань, картон, бумага и шнуры), рассмотренные выше, и изделия на минеральных и полимерных связующих.

Одним из материалов данной группы является пеноасбест, который получают из распушенных асбестовых волокон и технической пены при дополнительном диспергировании при помощи химических реагентов. Пеноасбест является особо лёгким материалом ($\rho = 20-60$ кг/м 3) с термостойкостью до 400 °С и теплопроводностью 0,028–0,45 Вт/м $\cdot$ °С.

Наиболее распространённым материалом данной группы является асбестоцемент (асбоцемент, хризотилцемент), представляющий собой цементное вяжущее с асбестовым наполнителем для получения асбестоцементных (асбестобетонных) изделий в виде листов (в том числе волнистые листы – асбестоцементный шифер), плит, труб, муфт и полуцилиндров для строительной и технической теплоизоляции.

К асбестодиатомитовым и асбестотрепельным материалам, применяемым в качестве мастик (при затворении водой) для тепловой изоляции труб и оборудования, для штукатурных работ или в производстве плит и фасонных изделий, относятся:

– Асбозурит ($\lambda = 0,144$ Вт/м $\cdot$ °С), который выпускается в виде порошка из смеси диатомита или трепела (70%) и асбеста (30%). Разновидностью данного материала является новоасбозурит, в котором асбест наполовину заменен на асбестоцементные

отходы. Асбозурит выдерживает температуры до 600 °С;

– Асботермит ($\lambda = 0,116-0,14$ Вт/м $\cdot$ °С), который выпускается в виде порошка из смеси диатомита или трепела (15–20%), асбеста (10–15%) и асбестоцементных отходов (70%). Асботермит выдерживает температуры до 800 °С;

– Асбослюда ($\lambda = 0,13-0,15$ Вт/м $\cdot$ °С), которая выпускается в виде порошка из смеси диатомита или трепела (60%), асбеста (10–12%), асбестоцементных отходов (20%) и дробленой слюды (8–10%);

– Асбозонолит ($\lambda = 0,16-0,18$ Вт/м $\cdot$ °С), который выпускается в виде порошка из смеси диатомита или трепела (70%), асбеста (15%) и вспученного вермикулита, называемого зонолитом (15%).

К асбестомагнезиальным материалам ($\lambda = 0,086-0,091$ Вт/м $\cdot$ °С) относятся выпускаемые в виде порошков совелит, состоящий из смеси углекислых солей магния и кальция (85%), которые получают переработкой доломита (обжигом, гашением и карбонизацией), и асбеста (15%), и ньувель (асбестомагнезиальный порошок), состоящий из магнезии (85%) и асбеста (15%). Совелит применяется наравне с асбестодиатомитовыми и асбестотрепельными изделиями, а ньувель из-за высокой стоимости применяется только в качестве теплоизоляционных мастик. Эти материалы применяются при температурах до 450–500 °С.

Из асбесто-известково-кремнезёмистых материалов наиболее распространён вулканит ($\lambda = 0,08$ Вт/м $\cdot$ °С), который представляет собой смесь из диатомита или трепела (60%), извести-пушонки (20%), получаемой при взаимодействии оксида кальция с ограниченным количеством воды, и асбеста (20%). Название данного материала связано с тем, что изначально в состав для его производства входил вулканический пепел [10]. Вулканит применяют в качестве теплоизоляционных мастик, а также для производства плит и фасонных изделий с автоклавной обработкой. Вулканит применяют при температурах до 600 °С.

К асбестосодержащей теплоизоляции также относятся асбовермикулит и асбоперлит (асбестовермикулит и асбоперлит), представляющие собой смеси асбеста с вспученным вермикулитом или вспученным перлитом в виде песка. Данные виды теплоизоляции наносятся методом напыления в смеси с цементом или жидким стеклом и водой на промышленное оборудование (преимущественно паровые котлы), трубы или здания, а также применяются в качестве наполнителей для производства штучных изделий на различных связую-

щих. Стоит отметить, что аналогичный метод напыления применяется для нанесения слоя асбоминваты.

К асбестосодержащей теплоизоляции также относится материал под названием асболит, который по одним источникам представляет собой цементное вяжущее с асбестовым наполнителем (асбоцементная фанера, асбофанера) [11], по другим источникам является магниальным вяжущим со смесью опилок и асбеста в качестве заполнителя (в данном случае материал является асбестосодержащей разновидностью ксилолита) [12], а в ряде случаев под этим названием подразумевают материал, состоящий из известкового вяжущего (известки-пушонки), заполненного смесью асбеста и перлита [13]. Таким образом, асболиты фактически являются разновидностью легких бетонов на различных вяжущих, в которых заполнителями наряду с асбестом могут быть и другие материалы. Асболиты применяются в строительной и технической теплоизоляции. Стоит отметить, что под названием асболит также известен слоистый материал из листов асбокартона на резольном фенолформальдегидном связующем, применяемый наряду с асботекстолитом, в котором наполнителем является асбестовая ткань, для изготовления электротехнических и фрикционных изделий [14].

К терминам, применяемым для асбестосодержащей теплоизоляции, относится и «асбестит», который в ряде источников является синонимом терминов «асбестовое волокно», «асбестовая крошка» (мелкая фракция асбестового волокна), однако авторы данной работы считают более предпочтительной информацию, согласно которой асбестит является теплоизоляционным материалом ($\lambda = 0,3 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$), получаемым из смеси каолина (30%) и асбеста или асбестовых отходов (70%), иногда с добавлением 3–4% алебаstra и ограниченно применяемым для теплоизоляции паровых котлов и труб [15].

К данной группе материалов также относятся так называемые асбестовые маты, представляющие собой чехлы из асбестовой ткани, заполненные ньювелем, соевлитом или минватой и прошитые асбестовой нитью.

Все рассмотренные асбестосодержащие материалы и изделия за счет наличия асбеста обладают высокой прочностью, температуростойкостью, химической стойкостью и огнестойкостью, однако при этом у них повышаются хрупкость и водопоглощение, а канцерогенность асбестовых волокон снижает экологичность и является главной причиной снижения объемов ис-

пользования данной группы теплоизоляционных материалов.

Прочая теплоизоляция на неорганической основе

Наряду с рассмотренными выше материалами и изделиями в настоящее время для теплоизоляции широко применяется измельченное минеральное сырье и изделия, получаемые из него при помощи связующих или в результате высокотемпературной обработки.

Одними из наиболее распространенных теплоизоляционных материалов и изделий данной группы являются легкие бетоны, представляющие собой цементные, известковые, гипсовые, магниальные, золовые или шлаковые вяжущие или их смеси, в которых заполнителем является природное или техногенное сырье в виде щебня, гравия или песка. В дополнение к легким минеральным заполнителям в состав легких бетонов вводится кварцевый песок. Также существуют легкие бетоны, которые получают с минимальным количеством кварцевого песка или при его отсутствии и называют беспесчаными (крупнопористыми) бетонами, однако такие бетоны отличаются низкими значениями прочности и теплопроводности. В качестве теплоизоляционных также применяются беспесчаные бетоны на гранитном щебне. Разновидностью легких бетонов на гипсовых вяжущих является ферригипс или паста феррон – материал на основе гидроксидов железа и гипсового вяжущего с различными заполнителями. Стоит отметить, что изделия на основе гипсовых вяжущих в виде плит и блоков без заполнителей также применяются в качестве теплоизоляционных. К природным минеральным заполнителям, используемым для получения легких бетонов, относятся высокопористые породы: пемза, туфы (вулканические, известковые и кремнистые), тальк, известняк-ракушечник, трепел, диатомит и др. К техногенным минеральным заполнителям относятся в первую очередь отходы: зола уноса, бой кирпича и шлаки (топливный, доменный и электротермофосфорный). К заполнителям легких бетонов также относятся вспученные перлит и вермикулит (пенперлит и пеновермикулит), вспучивание которых происходит за счет удаления химически связанной воды при обжиге данных минералов, шунгизит, получаемый путем обжига шунгита (вспучивание происходит за счет углерода, содержащегося в шунгите и выгорающего при обжиге), алюмосиликатные или стеклянные микросферы, а также следующие искусственные заполнители:

– керамзит ($\lambda = 0,1-0,18$ Вт/м $^{\circ}$ С), представляющий собой овалы частицы с гладкой поверхностью и пористой структурой. Получают керамзит из легкоплавких глин, содержащих оксиды железа, карбонатные и органические примеси. При обжиге происходит переход глины в пиропластическое состояние и ее вспучивание за счет выделяющихся газов: кислорода при раскислении оксидов железа, водяного пара при удалении химически связанной воды, углекислого газа при разложении карбонатов и выгорании органических примесей;

– аглопорит ($\lambda = 0,12-0,26$ Вт/м $^{\circ}$ С), получаемый из глинистых материалов (суглинки, супеси, лессы) с добавлением выгорающих добавок (угля, золы, опилок, лигнина и др.) или топливосодержащих отходов (топливные шлаки, золы, отходы добычи сланцев и угля) с добавлением глинистых материалов. Данный материал производят путем агломерации методом спекания в результате слоевого обжига при температуре около 1000 $^{\circ}$ С с интенсивным просасыванием воздуха через слой шихты. После обжига получается так называемый корж, который дробят с получением аглопоритовых щебня и песка;

– вакулит, представляющий собой полый шарообразный наполнитель и получаемый из глины, диатомита или трепела при выгорании органических добавок (опилки, уголь, торф, лигнин, нафталин и др.). Производство вакулита позволяет использовать невспучивающееся сырье [16];

– азерит, получаемый путем плавления глинистого сырья с получением стеклообразного продукта при 1450–2000 $^{\circ}$ С, который измельчают, смешивают с глиной и коксом, опудривают огнеупорными порошками и вспучивают при 900–1000 $^{\circ}$ С. Название азерита связано с Азербайджаном, где была разработана технология его изготовления;

– термолит, представляющий собой обожженные при температурах 1100–1250 $^{\circ}$ С щебень или гранулы из диатомита, трепела, опок и др. опаловых пород;

– термозит (шлаковая пемза), получаемый плавлением металлургических и электротермофосфорных шлаков при их быстром охлаждении водой, воздухом или паром, которое сопровождается поризацией расплава. Получаемый продукт измельчают с получением термозитовых щебня и песка.

С увеличением размера частиц наполнителя и его количества в составе легкого бетона понижаются теплопроводность и прочность, повышается водопоглощение материала. В зависимости от свойств различают конструкционные, конструкционно-теплоизоляционные и теплоизоляционные

разновидности легких бетонов. Для бетонов на легких минеральных заполнителях характерны более высокие, чем для других видов теплоизоляции, значения прочности и теплопроводности, химическая стойкость, долговечность и биостойкость. К недостаткам данных материалов относятся хрупкость, среднее для теплоизоляционных материалов водопоглощение. Разновидностью легких бетонов являются ячеистые бетоны, в которых за счет газообразователя (получение газобетонов и газосиликатов), пенообразователя (получение пенобетонов и пеносиликатов) или обеих добавок (получение пеногазобетонов и газопенобетонов, газопенобетонов и газопеносиликатов) формируется пористая структура. Ячеистые бетоны могут производиться с легкими минеральными заполнителями или без них. Легкие бетоны, в том числе ячеистые, подробно рассмотрены в работе [17], выпускаются в виде штучных изделий или применяются в качестве монолитной теплоизоляции в строительстве.

Схожей с легкими бетонами по составу является группа отделочных материалов, которые называют теплыми штукатурками и применяют для наружных и внутренних работ, заделки щелей, теплоизоляции трубопроводов. К неорганическим заполнителям теплых штукатурок относятся гранулированное пеностекло, вспученные перлит и вермикулит, алюмосиликатные или стеклянные микросферы. В качестве связующей основы для наружных работ применяется цементное вяжущее, а для внутренней отделки применяются смеси на основе извести и гипса. Преимуществами теплых штукатурок являются хорошая адгезия к различным поверхностям, высокая пластичность, экологичность, негорючесть, долговечность и возможность нанесения на поверхности любой формы без использования крепежных элементов, которые могут стать мостиками холода. Недостатками теплой штукатурки являются большая масса в сыром виде, необходимость нанесения в несколько слоев с перерывами для твердения каждого слоя, среднее водопоглощение и сравнительно высокая цена.

Следующими по распространенности после легких бетонов являются керамические теплоизоляционные материалы, низкая теплопроводность которых обеспечивается высокой пористостью (более 45%), наличием сквозных и несквозных вертикальных технологических пустот (13–50% от объема) или совмещением пористости и пустот, которое реализовано в производстве поризованных керамических блоков, являющихся конструкционно-теплоизоля-

ционными изделиями [17]. Для получения пористой керамики применяют добавки, которые при обжиге выгорают (опилки, торф, уголь, полимерные отходы и др. [18–20]) или разлагаются с выделением углекислого газа или водяных паров (известняк, доломит, карбонатсодержащий гальванический шлак и др. [21–23]). Технологические пустоты в керамике в ряде случаев заполняют вспученным перлитом [24].

Для получения ячеистой керамики (пенокерамики), выпускаемой в виде блоков, используют вспучивающиеся глины, которые применяют в производстве керамзита, вводят в состав шихты газообразователь (алюминиевая пудра) или пенообразователи (клееканифольный, алюмосульфидно-нафтенный, алкилсульфатный), проводят вспучивание за счет введения в состав шихты жидкого стекла с последующими интенсивным перемешиванием под давлением или обработкой сверхвысокочастотным излучением [25]. Относительно новой разновидностью пенокерамики является материал, известный под торговым названием амуркав, который разработан в Армении и производится на основе местных легкоплавких глин и местных туфов, которые снижают температуру вспучивания глин и расширяют температурный интервал получения ячеистой структуры [26].

Среди теплоизоляционной керамики выделяют материалы с мелкопористой структурой, получаемые на основе диатомита, трепела или их смесей с глинами – диатомитовую (диатомовую) и трепельную теплоизоляции [27, 28]. Диатомитовые и трепельные изделия получают при помощи выгорающих добавок или без них. Возможность получения мелкопористой структуры связана с тем, что диатомиты и трепелы состоят из микроскопических частиц опалового вещества и кремнистых скелетов водорослей диатомей. Повышенными теплоизоляционными свойствами при меньших прочностных показателях обладают пенодиатомитовые и пенотрепельные изделия, получаемые при добавлении в шихту пенообразователей растительного происхождения: сапонины или сосновой канифоли.

Керамические теплоизоляционные блоки, фасонные изделия и так называемые легкие кирпичи применяют для заполнения каркасных стен или для изоляции труб, печей, котлов и др. теплотехнического оборудования, работающего при температурах до 900 °С (850 °С в случае пенокерамических, пенодиатомитовых и пенотрепельных изделий).

Для теплоизоляции теплотехнического оборудования, работающего при бо-

лее высоких температурах, применяются штучные изделия из легковесных огнеупоров (динасовых, шамотных, каолиновых, муллитокремнеземистых, муллитовых, циркониевых и корундовых), получаемых из огнеупорных глин или сырья с высоким содержанием оксидов кремния, алюминия и циркония. Пористость легковесных огнеупоров обеспечивается выгорающими или разлагающимися при обжиге добавками, применением пенообразующих веществ. К легковесным огнеупорам можно отнести материал, известный под торговым названием керамвол и получаемый из каолиновой ваты (70%) на связующем из бентонитовой глины (30%).

К преимуществам керамической теплоизоляции, в том числе огнеупорной, относятся сравнительно высокая прочность на сжатие и низкое водопоглощение, хорошая теплоизоляция, негорючесть, термостойкость и экологичность. Недостатками этих материалов являются хрупкость, сравнительно высокая масса и стоимость. Стоит отметить, что вспененные (вспученные) материалы с ячеистой структурой отличаются меньшими значениями теплопроводности и прочности по сравнению с пористыми материалами, а изделия с пустотами отличаются наибольшими значениями теплопроводности и прочности.

Пемза, техногенные шлаки, измельченный гипс, вспученные перлит и вермикулит, шунгизит, керамзит и другие искусственные минеральные заполнители, бой легких бетонов, в том числе ячеистых бетонов, диатомитовых и пенодиатомитовых изделий, широко применяются в качестве насыпной теплоизоляции стен, полов, чердаков и межэтажных перекрытий.

В отдельную группу выделяют перлитовые изделия, представляющие собой наполненные вспученным перлитом связующие на основе битума (перлитобитумные изделия и битумперлит), цемента (перлитобетонные изделия, перлитцемент и асбоперлитцемент), извести (перлитосиликат), гипса (гипсоперлит), жидкого стекла (перлитовый обжиговый легковес или стеклоперлит), жидкого стекла и ортофосфорной кислоты (перлитофосфогелевые изделия), силикат-глыбы и кремнефтористого натрия (перлитогелевые изделия), глинистых материалов (перлитокерамика или керамоперлитовые изделия, перлитсодержащий или перлитовый кирпич, перлитошамот), смеси глины и фосфатов (керамоперлитофосфатные изделия), фенолформальдегидной или карбаминоформальдегидной смол (перлитопластбетон или пластперлит), семиводного сульфата магния (эпсоперлит), гидроксида

натрия или его соли (термоперлит) или лигносульфоната (лигноперлит). К этой группе также относятся карбоперлит, который получают обработкой газами, содержащими CO_2 , массы из вспученного перлита и известкового связующего, и базальто-перлитовый волокнистый материал, получаемый при использовании вспученного перлита и базальтового волокна для наполнения цементного или бентонитового связующего. В зависимости от вида и количества связующего перлитовые изделия (плиты, блоки, кирпичи и фасонные изделия) отличаются теплопроводностью 0,065–0,239 Вт/м $^{\circ}\text{C}$ и могут применяться при температурах от -200 до 600–900 $^{\circ}\text{C}$. Перлитовые изделия применяются для строительной и технической теплоизоляции, отличаются средними значениями прочности и плотности, огнестойкостью и для большинства связующих экологичностью. Недостатки данных изделий связаны со сравнительно высоким водопоглощением и хрупкостью частиц вспученного перлита.

Также отдельно рассматривают вермикулитовые (зонолитовые) изделия, представляющие собой наполненные вспученным вермикулитом связующие на основе цемента (цементовермикулит, вермикулитобетон) и известковых вяжущих (силикатовермикулит) для строительной теплоизоляции, глинистого сырья (керамовермикулитовые изделия) и битумов (вермикулитобитум) для строительной и технической теплоизоляции, а также асбозонолит и асбовермикулит, рассмотренные выше. Недостатки вермикулитовых изделий связаны с высоким водопоглощением вспученного вермикулита [29].

В последнее время для теплоизоляции промышленных тепловых агрегатов и каминов, а также в качестве противопожарных перегородок стали широко применяться силикатно-кальциевые (силикат-кальциевые, кремнево-кальциевые) плиты (панели) и листы, которые получают путем приготовления водной суспензии из кремнезема или высококремнеземистых материалов и извести, заливки суспензии в форму и автоклавной обработки изделий. Во время обработки при температурах 950–1500 $^{\circ}\text{C}$ происходит реакция между оксидом кремния и карбонатом кальция с образованием силиката кальция и углекислого газа, формирующего мелкопористую структуру материала. Для дополнительного повышения пористости в состав суспензии иногда вводят пенообразователи (например, алюминиевую пудру), а для повышения прочности нередко добавляют стекловолокна, базальтовые, керамические, углеродные, полипропиленовые, целлюлозные и др. волокна. Силикат-

но-кальциевые плиты отличаются низкой теплопроводностью (0,053–0,07 Вт/м $^{\circ}\text{C}$), термостойкостью (от -200 до +1100 $^{\circ}\text{C}$), огнестойкостью, экологичностью, легкостью, высокой прочностью, биостойкостью, химической стойкостью и легкостью механической обработки. Основным недостатком данных плит является сравнительно высокая стоимость. Из данного материала могут также выпускаться сэндвич-панели, в которых средний слой сделан из полистиролбетона, и фасонные изделия.

Также в последнее время распространение получает аэрогелевая теплоизоляция для труб и промышленного оборудования в виде матов из стеклянных, керамических, полиэстеровых или карбоновых волокон, на которые нанесены аэрогели на основе оксида кремния (кварцевые аэрогели), а также оксидов алюминия, хрома или олова. Аэрогели получают из обычных гелей путем замены жидкости на газовую фазу при высоких температуре и давлении. Например, кварцевый гель получают из силикагеля, представляющего собой обезвоженный гидрогель кремниевой кислоты, который в свою очередь получают при взаимодействии жидкого стекла с серной кислотой с последующими промывкой и высушиванием. Аэрогели отличаются уникальными значениями плотности (1,9 кг/м 3), пористости (около 99%) и теплопроводности (0,013–0,019 Вт/м $^{\circ}\text{C}$ при теплопроводности воздуха 0,024 Вт/м $^{\circ}\text{C}$), термостойкостью (1200 $^{\circ}\text{C}$ для кварцевого аэрогеля), негорючестью, прочностью, несжимаемостью, звукоизоляционными свойствами, экологичностью, а при обработке специальными добавками аэрогели приобретают гидрофобность и химическую стойкость. Недостатками аэрогелей являются хрупкость и высокая стоимость. Применение волокнистых материалов со слоем аэрогеля позволяет снизить их теплопроводность примерно в два раза при сохранении остальных свойств. Существуют разработки по применению пастообразного материала с частицами аэрогеля для заполнения технологических пустот в керамических кирпичача с получением аэрокирпичей [30].

Аэрогели наряду со стекловолокном и микрокремнеземом (ультрадисперсные частицы диоксида кремния шарообразной формы) применяются в качестве неорганического сердечника (ядра) для вакуумных теплоизоляционных панелей (VIP-панели от английского vacuum insulation panels), представляющих собой пленочную оболочку из металлизированной полиэфирной пленки, алюминиевой или стальной фольги, в которой для обеспечения низкой тепло-

проводности создается вакуум, а для обеспечения жесткости, герметичности и прочности с обеих сторон пленки наносится полимерное покрытие [31–33]. VIP-панели с дополнительными декоративно-защитными оболочками и без них применяются для теплоизоляции холодильных установок и ограждающих конструкций зданий.

К неорганической также можно отнести отражающую теплоизоляцию в виде алюминиевой или стальной фольги, применяемых в качестве отражающего слоя в различных композитных изделиях или в комбинации с другими изделиями в строительной и технической теплоизоляции, а также в виде тонких алюминиевых или стальных листов, применяемых в качестве отражателей. Существуют многослойные разновидности алюминиевой фольги (альфоль, термаль), представляющие собой одну или несколько лент гофрированной бумаги, на гребни которой наклеена алюминиевая фольга. Эти многослойные композиции сочетают отражательную способность фольги и низкую теплопроводность воздушных прослоек, но отличаются малыми прочностью и водостойкостью. Другой разновидностью алюминиевой фольги является армофол, представляющий собой армированную стеклотканью или полипропиленовым волокном (армофол экстра) фольгу, которая для защиты от окружающей среды может быть покрыта полиэтиленовой пленкой (армофол А-LP). Различают виды армофола, покрытые фольгой с одной стороны, с двух сторон, пропитанные клеевым составом и имеющие с одной из сторон самоклеящийся слой.

Заключение

На сегодняшний день существует множество теплоизоляционных материалов на неорганической основе и изделий из них, что позволяет подобрать материал в зависимости от утепляемой поверхности и температурного режима. Такое разнообразие объясняется широким выбором применяемого неорганического сырья, преимущественно минеральных материалов, которые в большинстве случаев широко распространены в природе, могут быть легко синтезированы или являются крупнотоннажными техногенными отходами. Однако стоит отметить, что некоторые виды природного минерального сырья широко распространены только в определенных регионах, поэтому применение теплоизоляции на их основе в других регионах ограничено. Другим ограничением для ряда неорганических теплоизоляционных материалов является их высокая стоимость. Для всех

рассмотренных материалов и изделий можно выделить преимущества, связанные с их неорганической основой: экологичность, долговечность, термостойкость, огнестойкость и негорючесть. В сочетании со сравнительно высокими значениями прочности, хорошими тепло- и звукоизоляционными характеристиками некоторые из рассмотренных материалов можно применять в качестве конструкционных, облицовочных, звукоизоляционных, огнезащитных и др. Распространенность сырья и преимущества рассмотренных материалов и изделий являются предпосылками для их дальнейшего широкого распространения и массового применения, появления новых и совершенствования существующих теплоизоляционных материалов на неорганической основе.

Список литературы

1. Yörükoğlu A., Akkurt F., Çulha S. Investigation of boron usability in rock wool production. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 243. Article 118222.
2. Wang W., Chen J., Yu J., Zhou L., Dai S., Tian W. Adjusting the melting and crystallization behaviors of ferronickel slag via partially replacing of SiO_2 by B_2O_3 for mineral wool production. *Waste Management*. 2020. Vol. 111. P. 34–40.
3. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Характеристика современных материалов для облицовки фасадов и цоколей зданий и сооружений // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2020. № 4. С. 55–61.
4. Минько Н.И., Пучка О.В., Евтушенко Е.И., Нарцев В.М., Сергеев С.В. Пеностекло – современный эффективный неорганический теплоизоляционный материал // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 6–4. С. 849–854.
5. Мелконян Р.Г., Суворова О.В., Макаров Д.В., Мананова Н.К. Производство стеклообразных пеноматериалов: проблемы и решения // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2018. Т. 10. № 1. С. 133–156.
6. Сопегин Г.В. Перспективы применения пеностекла в строительстве // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2017. Т. 2. С. 418–424.
7. Терещенко И.М., Дормешкин О.Б., Кравчук А.П., Жих Б.П. Получение теплоизоляционных материалов на основе кремнегеля по одностадийной технологии // *Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ*. 2015. № 3. С. 97–101.
8. Воробьева А.А., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Исследование влияния температурного режима на физико-механические свойства пеносиликатного материала на основе сырья Владимирской области // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 10–1. С. 26–30.
9. Углова Т.К., Новоселова С.Н., Татаринцева О.С. Экологически чистые теплоизоляционные материалы на основе жидкого стекла // *Строительные материалы*. 2010. № 11. С. 44–46.
10. Кузнецов Ю.С., Новокрещенова С.Ю., Мороз М.Н., Тимофеева А.Ю. Асбестосодержащие композиционные материалы // *Вестник Волжского регионального отделения российской академии архитектуры и строительных наук*. 2010. № 13. С. 155–158.
11. *Техническая энциклопедия*. Т. 1. А – Аэродинамика / Под ред. Л.К. Мартенса. М.: АО «Советская энциклопедия», 1927. 440 с.
12. *Краткий технический словарь* / Под ред. А.А. Арманды, Г.П. Браило. М.-Л.: ГТТИ, 1934. 610 с.

13. Конструктивная противопожарная защита. Информационная система Sea-technics.ru. [Электронный ресурс]. URL: <http://sea-technics.ru/konstruktivnaya-protivopozharnaya-zashchita> (дата обращения 14.08.2020).
14. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С. Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолформальдегидных смол // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 96–114.
15. Васильев Н.Н., Исаакян О.Н., Рогинский Н.О., Смолянский Я.Б., Сокович В.А., Хачатуров Т.С. Технический железнодорожный словарь. М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1941. 2974 с.
16. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение: учебное пособие для строит. спец. вузов. 2-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2004. 701 с.
17. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Современные энергоэффективные конструкционные и облицовочные строительные материалы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 7. С. 76–87.
18. Андреева Ж.В., Захаров А.И. Пористая керамика с регулярной структурой // Успехи в химии и химической технологии. 2012. № 6. С. 11–13.
19. Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Применение полимерных и стекольных отходов для получения самоглазующейся облицовочной керамики // Экология и промышленность России. 2019. № 11. С. 38–42.
20. Перовская К.А., Петрина Д.Е., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Применение полимерных отходов для повышения энергоэффективности стеновой керамики // Экология промышленного производства. 2019. № 1. С. 7–11.
21. Букатин М.В. Утилизация отходов нефтепереработки и химии в производстве керамических изделий // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2015. № 2. С. 217–229. [Электронный ресурс]. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2015/ogbus_2_2015_p217-229_BukatimMV_ru.pdf (дата обращения 14.08.2020).
22. Шахова В.Н., Березовская А.В., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г., Сысоев Э.П. Разработка облицовочного керамического материала с эффектом самоглазурования на основе малопластичной глины // Стекло и керамика. 2019. № 1. С. 13–18.
23. Сухарникова М.А., Пикалов Е.С. Исследование возможности производства керамического кирпича на основе малопластичной глины с добавлением гальванического шлама // Успехи современного естествознания. 2015. № 10. С. 44–47.
24. Zukowski M., Haese G. Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation. Energy and Buildings. 2010. Vol. 42. Iss. 9. P. 1402–1408.
25. Дмитриев К.С. Пористая керамика: современное состояние и перспективы // Международный журнал экспериментального образования. 2016. № 7. С. 152–154.
26. Амамчян М.Г. Технология получения теплоизоляционного материала на основе легкоплавких глин // Строительные материалы. 2009. № 8. С. 67–68.
27. Баранова М.Н., Коренькова С.Ф., Чумаченко Н.Г. История освоения кремнистых пород // Строительные материалы. 2011. № 8. С. 4–7.
28. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Разработка энергоэффективной облицовочной керамики на основе местного сырья и стекольного боя // Экология промышленного производства. 2019. № 3. С. 22–26.
29. Rahmad A.M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 125. P. 53–62.
30. Васильева И.Л., Немова Д.В. Перспективы применения аэрогелей в строительстве // Alfabuild. 2018. № 4. С. 135–145.
31. Liang Y., Wu H., Huang G., Yang J., Wang H. Thermal performance and service life of vacuum insulation panels with aerogel composite cores. Energy and Buildings. 2017. Vol. 154. P. 606–617.
32. Барабанщиков Ю.Г., Шарифуллина А.Р. Эффективность использования вакуумных теплоизоляционных панелей в строительстве // Синергия Наук. 2017. № 11. С. 815–821.
33. Ахмедов С.И., Долгов И.П., Киселев Н.Н. Новые материалы оболочек вакуумированных теплоизоляционных панелей // Огарёв-Online. 2017. № 11. [Электронный ресурс]. URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/novye-materialy-obolochek-vakuumirovannyh-teploizolyacionnyh-panelej> (дата обращения 14.08.2020).