

ОБЗОРЫ

УДК 691

СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ОБЛИЦОВОЧНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**Павлычева Е.А., Пикалов Е.С.***ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru*

Обеспечение энергосбережения и энергоэффективности зданий становится всё более актуальным в связи с повышением цен на энергоносители, ростом численности населения и увеличением объемов строительства. При этом главной задачей является снижение теплообмена зданий с окружающей средой для сохранения комфортных температурных условий в помещениях, что достигается за счет эффективной теплоизоляции строительных конструкций и применения энергоэффективных материалов при возведении зданий. Данная статья представляет собой обзор основных видов энергоэффективных строительных материалов, применяемых на сегодняшний день для возведения и облицовки несущих и ограждающих строительных конструкций. В обзоре приведена классификация и сравнительная характеристика данных материалов, рассматриваются особенности применения, преимущества и недостатки бетонов с легкими минеральными и органическими заполнителями, ячеистых бетонов, видов пористой керамики, многослойных композитных панелей и блоков, древесины, геополлимерных бетонов, термопрофилей, композитной арматуры, энергоэффективных стекол, фазопереходных материалов и др. Представленная в обзоре информация позволяет рассмотреть разнообразие энергоэффективных конструктивных и облицовочных материалов, оценить возможности и преимущества их применения для монолитного, монолитно-блочного и каркасного строительства малоэтажных и высотных зданий.

Ключевые слова: энергоэффективность, легкий бетон, ячеистый бетон, арболит, поризованная керамика, сэндвич-панели, термопанели, древесина

MODERN ENERGY-EFFICIENT STRUCTURAL AND FACING BUILDING MATERIALS**Pavlycheva E.A., 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*

Ensuring energy conservation and energy efficiency of buildings is becoming more and more relevant due to rising energy prices, population growth and increased construction volumes. At the same time, the main task is to reduce the heat exchange of buildings with the environment in order to maintain comfortable temperature conditions in the premises, which is achieved through effective thermal insulation of building structures and the use of energy-efficient materials in the construction of buildings. This article is an overview of the main types of energy-efficient building materials used today for the construction and facing of load-bearing and enclosing building structures. The review provides a classification and comparative characteristics of these materials, discusses the application features, advantages and disadvantages of concretes with light mineral and organic aggregates, cellular concretes, types of porous ceramics, multilayer composite panels and blocks, wood, geopolymer concretes, thermoprofiles, composite reinforcement, energy-efficient glasses, phase change materials and others. The information presented in the review allows us to consider a variety of energy-efficient structural and facing materials, evaluate the possibilities and advantages of their use for monolithic, monolithic-block and frame construction of low-rise and high-rise buildings.

Keywords: energy efficiency, lightweight concrete, cellular concrete, arbolite, porous ceramics, sandwich panels, thermal panels, wood

Вопросы энергосбережения и энергоэффективности во всех отраслях человеческой деятельности с каждым годом становятся всё более актуальными в связи с ростом цен на топливно-энергетические ресурсы, а также из-за необходимости решения вопросов рационального использования природных ресурсов и снижения антропогенного воздействия на окружающую среду. При этом энергосбережение заключается в рациональном использовании энергетических ресурсов, обеспечивающем снижение энергопотребления, а энергоэффективность характеризует разницу между количеством энергии, израсходованным на достижение конкретной задачи, и количеством энергии,

израсходованным в процессе достижения этой задачи. В то же время рост численности населения и увеличение объемов строительства, преимущественно жилых и общественных зданий, приводят к увеличению расходов электричества и тепловой энергии на эксплуатацию зданий. При этом часть электрической энергии и большая часть тепловой энергии расходуется на отопление, и эти расходы существенно повышаются в холодное время года, что особенно характерно для России и других стран с холодным климатом. Часть электроэнергии также тратится на кондиционирование воздуха в летний период. В связи с этим одной из основных задач обеспечения энергосбе-

режения при эксплуатации зданий является уменьшение теплообмена с окружающей средой, в первую очередь снижение тепловых потерь. Эта задача решается за счет повышения теплотехнических норм и использования энергоэффективных строительных материалов, снижающих теплопроводность строительных конструкций.

Возможны три конструктивных решения применения энергоэффективных материалов:

– теплоизоляция из энергоэффективных материалов с созданием многослойной конструкции с несущим слоем, когда слой теплоизоляции размещается внутри помещения, между двумя слоями несущих стен (так называемая колодезная кладка) или снаружи (при этом слой теплоизоляции укрывается вентилируемым фасадом, фасадной штукатуркой или слоем облицовочного материала);

– использование каркасных конструкций, в которых теплоизоляция из энергоэффективных материалов размещается в пространстве между двумя слоями облицовочного материала, закрепленного на несущем каркасе;

– использование энергоэффективных конструктивных и облицовочных материалов, которые позволяют сократить или полностью исключить дополнительную теплоизоляцию строительных конструкций.

Второй и третий варианты является более предпочтительными, так как позволяют уменьшить толщину стен здания, увеличить площадь помещения и снизить нагрузку на фундамент за счет сравнительно низкой плотности энергоэффективных материалов.

Целью данной работы является сравнительная характеристика и рассмотрение особенностей, преимуществ и недостатков основных видов энергоэффективных конструктивных и облицовочных строительных материалов. В своей работе авторы относят к конструкционным изделиям для несущих и ограждающих (наружные и внутренние не несущие стены, перегородки, перекрытия и крыши) конструкций.

Бетоны на легких минеральных заполнителях

Бетоны на легких (пористых) минеральных заполнителях являются разновидностью легких бетонов, в которых в качестве заполнителей наряду с кварцевым песком применяют высокопористые природные минералы (пемза, туф, вулканический шлак, вулканический пепел, известняк-ракушечник и др.), искусственные минеральные заполнители (керамзит и аглопорит, гранулированное пеностекло, вспученные перлит и вермикулит, шунгизит, термолит:

обожженные щебень или гранулы диатомита, трепела, опок и др.), а также такие минеральные отходы, как зола уноса, бой кирпича, топливный, доменный или электротермофосфорный шлак. Заполнители применяют в виде щебня, гравия, гранул или песка. В качестве вяжущих для получения легких бетонов применяют цемент, известь, гипс, магнезиальный цемент, а также зольные и шлаковые вяжущие. Также в составах для легких бетонов могут применяться смеси из перечисленных заполнителей и вяжущих.

Название получаемого легкого бетона зависит от его состава: в начале указывается заполнитель, а затем в зависимости от вида основного вяжущего добавляется окончание «бетон» для цемента, «силикат» для известковых вяжущих, «гипсобетон» или «гипс» для гипсовых вяжущих. Например, шлакопемзобетон получают при использовании шлаковой пемзы, представляющей собой вспученный доменный шлак (термозит, отсюда второе название материала – термозитобетон), в качестве заполнителя и цемента в качестве основного вяжущего, а золосиликат – при использовании золы в качестве заполнителя и извести в качестве вяжущего. Во многих источниках такие названия, как керамзитобетон и керамзитосиликат, считают синонимами, однако, по мнению авторов данной статьи, это разные материалы, так как между цементным и известковым бетонами есть отличия, а проведение аналогий связано с тем, что в большинстве случаев при производстве легких бетонов используют смеси из этих двух вяжущих с преобладанием одного из них, поэтому теоретически они должны называться силикатобетонами и бетоносилкатами (например, аглопоритобетоносилкат представляет собой легкий бетон с аглопоритом в качестве заполнителя и цементно-известковым вяжущим с преобладанием цемента).

Если рассматривать свойства легких бетонов в зависимости от вяжущего, то бетоны, для получения которых применялся в основном цемент, являются более прочными и водостойкими, бетоны, для получения которых применялись в основном гипсовые вяжущие, являются менее прочными и водостойкими, но у них лучше теплоизоляционные свойства и меньше плотность. Свойства легких бетонов, для получения которых применялись главным образом известковые вяжущие, занимают промежуточное положение. Также стоит учитывать, что преобладание цемента придает бетонам сероватый оттенок, а наличие известковых и гипсовых вяжущих – белый оттенок. Стоит отметить, что к энергоэффективным изде-

лиям относятся пазогребневые гипсоблоки и гипсоплиты, изготавливаемые из гипсовых или гипсоцементных вяжущих без заполнителей и с добавками для повышения влагостойкости. Такие блоки и плиты отличаются быстротой монтажа, экологичностью, легкостью, высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами, огнестойкостью и привлекательным внешним видом, однако у них высокое водопоглощение, невысокие значения влагостойкости и прочности, для них обязательна штукатурка или облицовка. Применяются гипсоблоки и гипсоплиты для внутренних ограждающих конструкций, гипсоблоки могут применяться и для несущих стен в малоэтажном строительстве при эксплуатации в сухих условиях.

Рассмотрим наиболее распространенные разновидности легких бетонов в зависимости от применяемого легкого минерального заполнителя.

Керамзитобетон и керамзитосиликат, как следует из их названий, получают при использовании в качестве заполнителя керамзита, получаемого при обжиге вспучивающихся глин, глинистых сланцев и представляющего собой частицы овальной формы с гладкой поверхностью и пористой структурой. Керамзитобетон отличается высокой для легких бетонов прочностью на сжатие, низким водопоглощением, хорошими теплоизоляционными свойствами и морозостойкостью, высокими звукоизоляционными свойствами, экологической безопасностью, негорючестью и хорошей гвоздимостью. Характерным для керамзитобетона недостатком является сложность механической обработки (резки, шлифования и т.п.). Близкими к керамзитобетону по свойствам, но несколько менее распространенными являются аглопоритобетон и аглопоритосиликат, перлитобетон и перлитосиликат, вермикулитобетон.

Шлакобетон, шлакосиликат и шлакогипс получают при использовании различных шлаковых отходов в качестве заполнителя. Применение металлургических шлаков позволяет повысить прочность бетона, а использование топливных шлаков увеличивает теплоизоляционные свойства материала. Однако стоит учитывать, что в топливном шлаке могут содержаться несгоревшие частицы угля, что снижает огнестойкость шлакобетона. Шлакобетоны характеризуются относительно высокими значениями прочности на сжатие и теплопроводности. Легкость механической обработки характерна для шлакобетонов на основе топливных шлаков, а хорошая гвоздимостью – для шлакобетонов на основе металлургических шлаков. К недостаткам шлакобетонов от-

носятся низкий уровень звукоизоляции, высокое водопоглощение, длительный период естественного твердения (до одного года). Еще одним недостатком является возможность содержания в шлаках опасных веществ и наличие радиационного фона, поэтому такой заполнитель нужно предварительно обрабатывать. Применение шлакощелочных вяжущих (с добавлением тонкомолотого шлака, активированного щелочью) позволяет снизить водопоглощение и повысить прочность бетонов. Применение термозита в качестве заполнителя повышает теплоизоляционные свойства, поэтому термозитобетон является самым распространенным видом шлакобетонов.

Золобетон, золосиликат и зологипс производят с использованием золы уноса теплоэлектростанций в качестве заполнителя. Золобетон отличается хорошей прочностью на сжатие, легкостью механической обработки, высоким водопоглощением, склонностью к сорбционному увлажнению и низкой водостойкостью, а возможное наличие несгоревшего топлива снижает его огнестойкость [1]. Применение тонкомолотой золы в качестве добавки к цементному вяжущему позволяет снизить водопоглощение и повысить прочность бетона.

Разновидностью легких бетонов данной группы также является сферобетон, в котором заполнителем являются алюмосиликатные микросферы, получаемые из золы уноса [2], или стеклянные микросферы [3]. По своим свойствам сферобетон близок к керамзитобетону, но у него выше прочность, меньше водопоглощение, выше водо- и атмосферостойкость.

Общими преимуществами рассмотренных легких бетонов являются хорошее сочетание низкой плотности, прочности и теплоизоляционных свойств (выделяют конструкционные, теплоизоляционно-конструкционные и теплоизоляционные легкие бетоны, для которых с уменьшением прочности повышается энергоэффективность), химическая стойкость, долговечность при хорошей гидроизоляции, биостойкость, повышенные по сравнению с обычным бетоном значения воздухо- и паропроницаемости. К общим недостаткам относятся низкая прочность на динамические и ударные нагрузки и неэстетичный внешний вид, необходимость облицовки для теплоизоляционных и утепления для конструкционных разновидностей легких бетонов.

Особенностями производства бетонов на легких заполнителях по сравнению с обычными бетонами является шероховатость поверхности и высокое водопоглощение частиц заполнителя, особенно в случае

крупных частиц, что снижает удобоукладываемость, осложняя получение монолитного бетона, повышает водопотребность, усложняя получение цементного раствора с требуемой влажностью, и повышает водопоглощение бетонов. Для бетонов на легких заполнителях также характерна более высокая усадка, что является причиной возникновения «мостиков холода» через кладочный раствор. Для снижения водопоглощения применяют покрытие частиц заполнителя битумом и вводят в цемент гидрофобизирующие добавки. От зернового состава заполнителя и его количества в составе смеси зависят свойства и назначение легкого бетона: чем крупнее частицы заполнителя и выше его содержание, тем меньше прочность и теплопроводность, выше водопоглощение. Для повышения прочности легкие бетоны могут применяться с арматурой. При этом стальную арматуру для защиты от коррозии покрывают жирным цементным раствором, повышают толщину защитного слоя или оштукатуривают бетонную поверхность.

Свойства легкого бетона зависят также от качества перемешивания и способа твердения. При автоклавном твердении за счет воздействия температуры и давления получают изделия правильной геометрической формы, с низкой гигроскопичностью и высокой прочностью. По этому методу твердения выше производительность, но больше энергоёмкость и можно выпускать изделия только в форме блоков, полублоков (продольных половин для устройства перегородок) и плит, например шлакобетонных блоков и плит (шлакоблоков и шлакоплит), шлакогипсовых блоков и плит и т.д. При твердении в естественных условиях (гидратационное твердение) процесс занимает длительное время, эксплуатационные свойства материала ниже, однако наряду с блоками и плитами возможно применение материала в монолитном строительстве. Блоки из легкого бетона изготавливают полнотелыми, пустотелыми (с технологическими пустотами), с одной или двумя (боковой и торцевой) лицевыми гранями, с рифленой, колотой, шлифованной или гладкой поверхностью.

Легкие бетоны конструкционного типа все более широко применяются в монолитно-блочном и монолитном высотном строительстве для возведения несущих и ограждающих конструкций, конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны широко используются в малоэтажном (до 3 этажей, преимущественно при строительстве одноэтажных домов) строительстве для несущих и ограждающих конструк-

ций, а также в высотном строительстве для ограждающих конструкций, теплоизоляционные легкие бетоны используются в многослойных строительных конструкциях. Конструкционные легкие бетоны также применяются в дорожном строительстве и при возведении мостовых конструкций.

Бетоны на лёгких органических заполнителях

В качестве заполнителей для данной группы легких бетонов применяют полимерные материалы в виде волокон (фибры) или гранул, а также следующие вещества и материалы растительного происхождения: древесные отходы (стружка щепы, опилки и т.д.), целлюлоза, солома, камыш, торф, костра (отходы от переработки льна и конопля), рисовая шелуха и др. Для данных легких бетонов применяются аналогичные предыдущей группе вяжущие, тот же принцип при наименовании разновидностей и деление на конструкционные, теплоизоляционно-конструкционные и теплоизоляционные разновидности.

Самым распространенным легким бетоном данной группы является арболит (древобетон или деревобетон, щепкобетон, щепобетон), в котором заполнителем является древесная щепа, преимущественно сосны и ели, реже лиственных пород, а вяжущим – цемент. Для повышения биостойкости древесной щепы, снижения водопроницаемости и повышения прочности арболита в состав смеси вводятся добавки-минерализаторы: хлорид кальция, жидкое стекло, силикат-глыба, сернокислый глинозем или известь. Для арболита характерны средние для легких бетонов плотность и прочность на сжатие, сравнительно высокая прочность на изгиб и высокий модуль упругости (высокая трещиностойкость), высокие тепло- и звукоизоляционные свойства, средняя морозостойкость, высокая гвоздимость и легкость механической обработки. Арболит относится к трудногорючим и экологически безопасным материалам с высокими воздухо- и паропроницаемостью (выше, чем у предыдущей группы легких бетонов). Еще одной особенностью арболита является возможность производства изделий не только в виде блоков и плит, но и со сложной, в т.ч. криволинейной, конфигурацией. Недостатками арболита являются высокое водопоглощение, относительно высокая усадка, низкая по сравнению с другими легкими бетонами точность геометрии, сравнительно высокая себестоимость (из-за расхода цемента и большого количества ручного труда) и необходимость защитно-декоративной отделки (покраска,

штукатуривание или облицовка). Разновидностями арболита являются легкие бетоны со смешанными наполнителями: золоарболит и керамзитоарболит, которые сочетают преимущества и недостатки применяемых заполнителей.

Схожими с арболитом материалами являются опилкобетон и стружкобетон. По сравнению с арболитом они обладают несколько меньшими значениями прочности, морозостойкости и водостойкости, но более высокими теплоизоляционными свойствами. Для улучшения прочностных характеристик древесный наполнитель минерализуют и в состав данных материалов вводят кварцевый песок, однако при этом повышается теплопроводность [4; 5]. Кроме того, в составе данных материалов цемент нередко частично заменяют глиной или известью.

Вторым после арболита по распространенности легким бетоном данной группы является полистиролбетон (пенопластобетон), в котором наполнителем являются гранулы пенополистирола и в который в качестве добавок часто вводят пластификаторы для улучшения пластичности и снижения трещиностойкости. Это материал с низкой стоимостью, обладает отличными теплоизоляционными и звукоизоляционными характеристиками, достаточно высокой прочностью на сжатие и средней прочностью на изгиб, низким водопоглощением, средней морозостойкостью, средней усадкой, долговечностью, биостойкостью, легкостью механической обработки. Недостатками полистиролбетона являются низкая адгезия между наполнителем и связующим, низкая адгезия к штукатурке, невысокая гвоздимось, непрочность монтажа окон и дверей, низкая паропроницаемость, наполнитель снижает химическую стойкость, выгорает и выделяет токсичные продукты при пожаре.

Широко распространенными материалами данной группы являются фибробетон, фибросиликат и фиброгипс, в которых в качестве наполнителя применяются волокна (фибра) из полипропилена, полиэтилена или целлюлозы, реже применяются арамидные волокна. Эти материалы обладают средними для легких бетонов значениями прочности и теплопроводности. В случае применения целлюлозной фибры теплопроводность ниже, но повышается водопоглощение, снижаются прочность, морозостойкость и влагостойкость. Существуют фибробетоны, армированные стекловолокном, базальтовой и стальной фиброй с высокой прочностью, однако теплопроводность у этих материалов также высокая. Разновидностью фибробето-

на является фибролит, в котором вяжущим является цемент, магнезиальное (магнезиальный фибролит) или гипсовое (таумалит) вяжущие, а наполнителем является древесная шерсть – особый вид стружки спиралевидной формы с большой длиной и малой шириной. Древесную шерсть получают в основном из хвойных деревьев и специально производят с помощью строгальных станков или вручную. Как и в случае с арболитом, при производстве фибролита проводят минерализацию древесной шерсти. Фибролит обладает средней прочностью, высокими теплоизоляционными свойствами и высоким по сравнению с арболитом водопоглощением, поэтому применяется только для внутренних стен и перегородок в сухих условиях либо для утепления стен и перегородок.

Менее распространенными, но достаточно широко применяемыми в индивидуальном строительстве для жилых и хозяйственных (гараж, сарай и т.д.) построек материалами являются соломобетон, а также камышебетон (камышитобетон) и костробетон (конопляный бетон, льнобетон), которые являются своего рода альтернативой саману (материал на основе глины и соломы). Для наполнителей этих материалов, как и для других растительных наполнителей, проводится предварительная минерализация. Данные материалы отличаются сравнительно невысокой прочностью, низкой огнестойкостью, высоким водопоглощением, высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами, поэтому применяются они в основном для внутренних перегородок или внешних ограждающих конструкций при каркасном строительстве, возможно их применение и в качестве несущих конструкций при одноэтажном строительстве [6–8]. Для повышения прочности в состав смесей для этих легких бетонов вводят кварцевый песок, а для защиты от действия влаги обязательна отделка.

Другими материалами, набирающими популярность в индивидуальном строительстве, являются торфобетон, торфосиликат и торфогипс, в которых наполнителем являются гранулы торфа. По своим свойствам и области применения такие материалы близки к соломобетону, камышебетону и костробетону. Для снижения горючести торфобетонных изделий в их состав вводятся антипирены. Существует технология, по которой на торфяные гранулы наносится слой глины, а затем в результате тепловой обработки торф выгорает, и остается пустотелая гранула, которая, по сути, является заменителем керамзита и аглопорита.

Для всех рассмотренных выше легких бетонов с органическими заполнителями по сравнению с другими легкими бетонами характерны более низкие прочность на сжатие и стоимость при более высоких теплоизоляционных свойствах, прочности на изгиб и эластичности. Общими для этой группы материалов недостатками являются сравнительно низкие показатели влагостойкости, биостойкости, химической стойкости, огнестойкости и долговечности. Низкая прочность данной группы бетонов ограничивает их применение несущими и ограждающими конструкциями в малоэтажном строительстве. Для повышения прочности бетонов данной группы применяется армирование стальной или композитной арматурой или фиброй.

Ячеистые бетоны

Ячеистые бетоны являются разновидностью легких бетонов с искусственно формируемой в процессе производства пористой структурой. Твердение данной группы легких бетонов, как и в случае применения легких минеральных заполнителей, проводится автоклавным способом или естественным путем. Для данных бетонов также применяются аналогичные двум предыдущим группам вяжущие, принципы наименования и деление на конструкционные, теплоизоляционно-конструкционные и теплоизоляционные разновидности. Ячеистые бетоны применяют в монолитно-блочном и блочном строительстве для возведения несущих и ограждающих конструкций малоэтажных и высотных зданий.

В зависимости от способа формирования пористой структуры различают следующие разновидности ячеистых бетонов [9]:

– газобетоны, газосиликаты и газогипс (газогипсобетон), для получения которых в смесь наряду с заполнителем (кварцевым песком) и вяжущим вводится алюминиевая пудра, интенсивно образующая газовые пузырьки водорода при добавлении воды во время перемешивания смеси. Существует разновидность данной технологии, заключающаяся в газообразовании под вакуумом;

– пенобетоны, пеносиликаты и пеногипс (пеногипсобетон), для получения которых в смесь наряду с заполнителем (кварцевым песком) и вяжущим вводятся пенообразователи (белковые, протеиновые или синтетические вещества), которые предварительно доводятся до состояния пены в пеногенераторах. В результате при перемешивании смеси воздушные пузырьки от пены обволакиваются вяжущим, превращаясь в замкнутые поры после твердения;

– аэрированный легкий (ячеистый) бетон и аэрированный ячеистый силикат, по-

лучаемые путем аэрирования смеси под давлением (барботирования сжатым воздухом) с последующим снижением давления до атмосферного (баротермальный способ);

– пеногазобетон, пеногазосиликат, газопенобетон и газопеносиликат, получаемые путем сочетания методов аэрирования и газообразования.

Газобетон и пенобетон по прочности на сжатие уступают большинству легких бетонов на минеральных заполнителях и превосходят легкие бетоны на органических заполнителях, прочность на изгиб у ячеистых бетонов низкая, водопоглощение высокое, средние показатели по теплоизоляционным свойствам и усадке, низкая гвоздимкость, они характеризуются легкостью механической обработки и огнестойкостью. По сравнению с газобетоном у пенобетона выше усадка, теплопроводность и морозостойкость при более низких водопоглощении и прочности. Кроме того, из-за неравномерного распределения пор по объему пенобетона и по размерам для этого материала характерна неоднородность свойств. Стоимость пенобетона ниже, чем у газобетона. Для ячеистых бетонов необходимы гидроизоляция и облицовка, а для конструктивных видов рекомендуется установка теплоизоляционного слоя.

Разновидностями ячеистых бетонов являются материалы, в которых дополнительно содержатся заполнители для первых двух групп легких бетонов. Широко распространены такие материалы, как пенозолобетон, газозолобетон, пеношлакобетон, газшлакобетон, пеноарболит и газоарболит. Применение таких материалов приводит к сочетанию преимуществ и недостатков заполнителей и ячеистых структур. Также получила распространение разновидность газозолобетона под торговым названием «твинблок», выпускаемая в форме блоков автоклавного твердения с торцевыми пазогребневыми элементами, позволяющими уменьшить толщину шва при кладке. Твинблоки характеризуются высокой точностью геометрии, высокими значениями прочности и морозостойкости, однако для них характерна сравнительно высокая стоимость. Другими широко распространёнными разновидностями ячеистых бетонов являются фибропенобетон и фиброгазобетон, в которых в качестве армирующего заполнителя могут применяться стальные, базальтовые, стеклянные, углеродные, полипропиленовые и целлюлозные волокна.

Пористая и пустотелая керамика

Наиболее распространенным представителем данной группы изделий является

поризованная (теплая) керамика, выпускаемая в виде блоков (керамические блоки, керамоблоки, термоблоки, керамический камень) или в виде поризованных (пористых) кирпичей (термокирпич). Поризованную керамику получают на основе глинистого сырья, а для формирования пор в качестве выгорающих добавок наиболее часто применяют древесные опилки, торф, солому, гранулы пенополистирола, углеотходы, топливный шлак, золу и сельскохозяйственные отходы (шелуху гречихи, подсолнечника, риса и т.д.). Для повышения энергоэффективности керамоблоки выпускают с вертикальными пустотами различной формы, расположенными в шахматном порядке, а для удобства укладки боковые поверхности делают с выступами типа «паз» и «паз-гребень». Термокирпичи также выпускают с пустотами. Пустоты в поризованной керамике нередко делают заполненными утеплителем (в основном перлитом и минеральным волокном). Для поризованной керамики характерны сравнительно высокая прочность на сжатие и невысокая прочность на изгиб, хорошие тепло- и звукоизоляция, воздухо- и паропроницаемость, низкое по сравнению с легкими бетонами водопоглощение (однако рекомендуется гидроизоляция и облицовочный слой), высокая морозостойкость, негорючесть, биостойкость, низкая взводимость, экологичность, средние показатели точности геометрии и способности к механической обработке. Недостатком наличия пустот и зазора при соединении паз-гребень является возможность затекания в них кладочного раствора, что повышает теплопроводность, но этот недостаток устраняется при использовании специальной пластиковой сетки. Также к недостаткам поризованной керамики относится достаточно толстый слой кладочного раствора, создающий «мостики холода» (недостаток исправляется за счет теплого кладочного раствора с легкими минеральными заполнителями: пемзовыми, шлаковыми и керамзитовыми песками, перлитом, вермикулитом, пеностеклом и др.).

К этой группе материалов также можно отнести пустотелые кирпичи и строительную керамику, получаемую путем обжига глинистого сырья с добавлением как вышеуказанных выгорающих добавок, так и добавок, разлагающихся с выделением газов, образующих поры (мел, доломит и др.). Актуальным является использование в качестве порообразующих добавок отходов, например в качестве выгорающих добавок можно использовать полимерные отходы [10; 11], а в качестве разлагающих-

ся при обжиге добавок – шлам от реагентной очистки сточных вод гальванического производства [12].

Главными недостатками наличия пор в керамике являются снижение прочности и повышение водопоглощения. Одним из вариантов устранения такого недостатка является жидкофазное спекание с формированием слоя глазури на поверхности изделий (переводит большинство открытых пор в закрытые) за счет использования плавней и добавок, формирующих при обжиге стекловидную фазу, например стеклобоя [11; 13]. Такой способ повышает теплопроводность, поэтому для сохранения энергоэффективности следует подбирать количество добавок таким образом, чтобы количество образующейся при обжиге стекловидной фазы позволило сохранить достаточно высокую внутреннюю пористость. Наличие слоя глазури на поверхности изделий позволяет применять их в качестве лицевых и облицовочных. Также существует возможность формирования развитой мелкопористой структуры за счет использования в качестве добавки в керамическую шихту мелкодисперсных веществ, например трепела [14]. Как и в случае с другими энергоэффективными материалами, конструкционные разновидности пористой керамики можно применять и для несущих стен при высотном строительстве, и для ограждающих конструкций. Изделия с высокими теплоизоляционными свойствами можно применять для несущих стен только в малоэтажном строительстве. В случае применения самоглазурирующей керамики с закрытопористой структурой в производстве плит можно использовать изделия для наружной облицовки при разной этажности. Также для всех керамических материалов характерны низкая температуропроводность и высокая теплоемкость, т.е. керамика долго нагревается и долго остывает, хорошо аккумулирует тепло, поэтому в домах из керамики температура мало изменяется в течение суток.

Композитные изделия

В эту группу авторами данной статьи были отнесены изделия, состоящие из нескольких слоев, один из которых является теплоизоляционным, придавая изделию и конструкции из него энергоэффективность.

Наиболее распространенными изделиями данной группы являются сэндвич-панели, представляющие собой два плоских или профилированных тонкостенных слоя из металла, поливинилхлорида или стекломгнезиевого листа, между которыми находится слой утеплителя (пенополиуретан,

пенополистирол или пенополиизоцианурат). Отдельные слои панели соединяются при помощи специального клея на полиуретановой основе. Сэндвич-панели отличаются легкостью, большим выбором цвета и быстротой монтажа. При сохранении целостности наружных слоев сэндвич-панели отличаются долговечностью, высокими теплоизоляционными характеристиками, морозостойкостью, стойкостью к агрессивным средам и атмосферостойкостью, однако у сэндвич-панелей плохая устойчивость к внешним механическим повреждениям. Еще одним недостатком сэндвич-панелей является низкая паропроницаемость. Различают стеновые и кровельные сэндвич-панели, причем у последних выше значения прочности и влагостойкости. Применяются сэндвич-панели для облицовки по системе вентилируемых фасадов, а также для возведения внешних и внутренних стен, кровельных работ при строительстве зданий с несущим каркасом.

Почти также широко распространены термопанели, являющиеся двухслойными изделиями, в которых внутренний слой выполнен из пенополистирола или пенополиуретана, а наружный слой выполняется из клинкерной, глазурованной керамогранитной или полимерпесчаной плитки, либо выполняется в виде имитации (из металла, полимерного покрытия, фибробетона и др.) под кирпичную кладку или натуральный камень. Преимущества и недостатки термопанелей практически идентичны по сравнению с сэндвич-панелями. Применяются термопанели для облицовки фасадов.

Схожими с сэндвич-панелями являются алюминиевые композитные панели (АКП или алюкобонд), состоящие из двух окрашенных алюминиевых листов, между которыми располагается полимерная композиция на основе полиолефинов или минеральный наполнитель на полимерном связующем. Существуют разновидности АКП, в которых внутренний слой выполнен из пенополиэтилена высокого давления или пенополиуретана – такие разновидности являются энергоэффективными изделиями. АКП отличаются легкостью, прочностью, гибкостью, морозостойкостью, влагостойкостью, разнообразием цветовой гаммы и долговечностью. Недостатками данных изделий являются горючесть, низкая абразивостойкость и сравнительно высокая стоимость [15].

Еще одним схожим с сэндвич-панелями видом изделий являются SIP-панели (от английского Structural Insulated Panel – конструкционно-изоляционная панель), в которых слой теплоизоляционного материала

(пенополистирол, пенополиизоцианурат, пенофенопласт или базальтовая вата) находится между двух панелей из ориентированно-стружечных плит, реже из других материалов: фанеры, фибролита, гипсокартонной или гипсоволокнистой плиты. Преимуществами таких панелей являются высокая энергоэффективность, средние значения прочности на сжатие и изгиб, простота монтажа и легкость. Недостатками SIP-панелей являются горючесть, средняя биостойкость, низкая влагостойкость, токсичность продуктов горения теплоизоляционного слоя, низкая паропроницаемость, необходимость герметизации стыков панелей, внутренней и наружной отделки. Применяются SIP-панели в каркасно-панельном малоэтажном строительстве для получения ограждающих конструкций.

Другим видом композитных изделий на древесной основе является утепленный брус (термобрус, теплбрус, композитный брус, клееный многослойный брус, пассивный брус), представляющий собой слой утеплителя (пенополистирол, пенополиуретан или пенополиизоцианурат, реже базальтовая или целлюлозная вата) между двумя ламелями (тонкими досками) из древесины, преимущественно хвойных пород, которые в длину могут состоять из нескольких фрагментов. Деревянные ламели предварительно высушивают и обрабатывают для повышения биостойкости. Существуют разновидности термобруса, состоящие из нескольких чередующихся слоев ламелей и утеплителя. Преимущества и недостатки термобруса практически идентичны по сравнению с SIP-панелями. Характерным преимуществом является точность геометрии, а характерным недостатком – недолговечность.

К этой группе изделий могут быть отнесены многослойные стеновые блоки (теплоэффективные блоки, теплблоки, полиблоки, теплостен, кремнегранит), которые представляют собой трехслойную конструкцию из несущего и лицевого слоев из конструкционного или теплоизоляционно-конструкционного керамзитобетона и внутреннего теплоизоляционного слоя из пенополистирола. При этом лицевой слой декорирован под природный камень, а раствор при кладке наносится на керамзитобетонные слои. Слои такого блока скреплены соединением «паз-шип» и стеклопластиковыми или базальтопластиковыми стержнями с ограничителями. Преимуществами теплблоков являются скорость возведения стен из них, легкость, низкая теплопроводность, низкая усадка, хорошая звукоизоляция и преимущества, характерные для керамзитобетона. Основной недо-

статок таких блоков в том, что стыки между блоками будут проходить по всей толщине стены, поэтому к качеству кладки применяются повышенные требования. Также недостатками можно считать низкую паропроницаемость, горючесть и токсичность продуктов горения пенополистирола в составе теплоблоков. Теплоблоки применяются для возведения несущих стен в малоэтажном строительстве и могут применяться для ограждающих конструкций в многоэтажном каркасном строительстве [16].

Композитными энергоэффективными изделиями являются стеновые блоки несъемной опалубки из арболита, известные под торговыми названиями «бризолит», «дюрисол» и «теколит». После сборки стен из таких блоков в пустоты внутри них заливается бетонный раствор. Пустоты блоков для наружных стен частично заполнены вкладышами из пенополистирола, которые повышают теплоизоляционные свойства возводимых стен. До заливки бетона остается возможность проведения труб канализации и отопления прямо внутри блоков. Для данных изделий характерны сравнительно высокая прочность на сжатие, средние значения водопоглощения, морозостойкости и огнестойкости, хорошие тепло- и звукоизоляционные свойства, паропроницаемость (значительно снижается при наличии вкладышей из пенополистирола). Недостатками блоков несъемной опалубки из арболита являются недолговечность и относительно высокая усадка. Применяются такие изделия для наружных и внутренних несущих стен многоэтажных зданий и частных малоэтажных загородных домов.

Другие энергоэффективные строительные материалы и изделия

Несмотря на появление новых строительных материалов, одним из востребованных и на сегодняшний день материалов остается древесина. Это связано с такими преимуществами древесины, как распространенность в природе, экологическая безопасность, легкость, высокие звуко- и теплоизоляционные свойства (теплопроводность древесины ниже, чем у ячеистых бетонов), относительно высокая прочность на сжатие и изгиб, хорошая гвоздимость, легкость механической обработки, химическая стойкость, высокие эстетические свойства. Вместе с тем у древесины много недостатков, к которым относятся низкие значения влагостойкости, атмосферостойкости и биостойкости, горючесть, высокие значения водопоглощения и гигроскопичности, анизотропия свойств и наличие пороков (сучки, косослой и др.), сравнительно

высокая стоимость. Свойства древесины сильно зависят от породы дерева, например осина отличается более высокой стойкостью к перепадам температур и влаги, а для дуба характерны высокие значения прочности и долговечности. Повысить водостойкость и биостойкость позволяет применение специальных пропиток или использование термодревесины, которая при производстве обрабатывается в безвоздушной среде при температуре около 180 °С, но в этом случае повышается стоимость материала. Строительными изделиями из древесины являются бревна (оцилиндрованные, строганные, окоренные), брус (цельный, профилированный, клееный), доска (террасная, блок-хаус, вагонка, сайдинг) и др. Изделия из древесины достаточно широко применяются в качестве отделочных материалов, а также для несущих и ограждающих конструкций в малоэтажном строительстве. К изделиям из древесины также относятся так называемые сучкоблоки, которые получают путем спрессовывания свежесрубленных ветвей в блоки, которые затем обвязывают в двух местах проволокой, удаляют неровности с боковых поверхностей, антисептируют и высушивают на воздухе. По своим свойствам сучкоблоки во многом схожи с другими изделиями из древесины, но отличаются меньшими значениями прочности и влагостойкости при более высоком водопоглощении. Различают конструкционные и теплоизоляционные разновидности сучкоблоков. Конструкционные блоки применяют в малоэтажном каркасном строительстве при обязательном наличии наружной облицовки [17].

К традиционным энергоэффективным материалам, применяемым для несущих и ограждающих конструкций в малоэтажном строительстве, относятся кирпичи, блоки и плиты из природных пористых минералов: туфа (также применяется как облицовочный материал), ракушечника и известняка. Для таких материалов характерны относительно высокая прочность на сжатие и невысокая прочность на изгиб, негорючесть, экологичность, средние теплоизоляционные свойства, высокое водопоглощение и средняя морозостойкость. Изделия из таких материалов применяются в первую очередь в регионах, где находятся их месторождения.

Относительно мало распространены в строительстве торфоблоки, известные также под названием «геокар» и получаемые путем прессования смеси из измельченного и увлажненного торфа, выполняющего роль связующего, с добавлением опилок, стружки, соломы, льнякостры и в ряде случаев минеральных добавок, повышающих

прочность и выполняющих роль антипиренов. Для торфоблоков характерны легкость, высокие тепло- и звукоизоляционные свойства, паропроницаемость, легкость механической обработки, биостойкость, невысокая прочность и горючесть. Торфоблоки применяются для внешних и внутренних ограждающих конструкций с обязательными наружной облицовкой (предпочтителен облицовочный кирпич) и внутренней отделкой.

Еще одним экологичным материалом являются грунтоблоки, которые, как следует из названия, получают прессованием природных грунтов, содержащих 15–30% глинистых частиц, с добавлением заполнителей (хвоя, опилки, торф, зола и др.). Для повышения прочности, влагостойкости и долговечности в состав грунтоблоков вводят цемент, известковые вяжущие или шлакоцемент с получением грунтобетонных блоков, а также смоляные, известково-смоляные или битумные стабилизаторы. Грунтоблоки и грунтобетонные блоки отличаются средней прочностью, низкой теплопроводностью, огнестойкостью и очень малой стоимостью. Недостатками грунтоблоков являются сравнительно высокое водопоглощение и невысокая влагостойкость. Разновидностью грунтоблоков являются глиноблоки (блоки из самана и блоки из глины с минеральными, древесными наполнителями и газообразующими добавками), которые наряду с кирпичом из самана и на сегодняшний день достаточно широко используются при возведении стен в малоэтажном строительстве в сухом климате.

Малораспространенным, но перспективным материалом является керпен (стеклокристаллическая пенокерамика), получаемый на основе природного глинистого сырья, смешанного с производственными отходами (стеклобой и шлаки) и карбидом кремния, который является газообразователем [18]. Керпен отличается средней прочностью на сжатие, легкостью, достаточно низкой теплопроводностью, низким водопоглощением, средней морозостойкостью, водостойкостью, негорючестью. Недостатками керпена являются низкая стойкость к ударным нагрузкам и хрупкость. Изделия из этого материала применяются для возведения внешних ограждающих конструкций, а также для облицовки стен и кровли.

На основе отходов могут быть получены и другие облицовочные изделия, представляющие собой композиционные материалы, в которых в качестве наполнителей применяются отходы минерального состава (стеклобой, кирпичный бой), а в качестве связующих термопластичные отходы (от-

ходы на основе поливинилхлорида и пенополистирола). Эти материалы отличаются средними значениями прочности на сжатие и изгиб, сравнительно низким водопоглощением и высокой морозостойкостью, средней для рассмотренных в данной работе материалов теплопроводностью [19; 20].

К энергоэффективным полимерным композиционным материалам также относятся теплоизоляционный и конструкционно-теплоизоляционный полимербетон, в которых связующими являются реактопластичные смолы (фурфурацетонная, карбамидоформальдегидная, фурано-эпоксидная, полиэфирная и др.), а в качестве наполнителя применяются древесные материалы (стружка, пробка), перлит или гранулы пенополистирола. Эти полимербетоны отличаются высокими значениями прочности, морозостойкости, абразивостойкости и химической стойкости при низких значениях теплопроводности и водопоглощения. Недостатками данных стройматериалов являются высокая стоимость, горючесть, сложность уплотнения композиционного материала и длительность отверждения связующих. Из конструкционно-теплоизоляционного полимербетона выполняют фундамент и несущие стены, а из теплоизоляционного – внутренние ограждающие конструкции.

Сравнительно мало распространенным, но перспективным и энергоэффективным материалом является геополлимерный бетон (геобетон), в состав которого входят тонкомолотое алюмосиликатное сырье (природные алюмосиликаты, зола уноса или доменный шлак), гидроксид натрия или калия, силикаты натрия и калия (преимущественно применяется раствор силикатов натрия и калия – жидкое стекло) [21–23]. При перемешивании щелочной компонент растворяет алюмосиликатное сырье с образованием раствора алюминатов и силикатов, которые полимеризуются с образованием геля, который в свою очередь твердеет с образованием геополлимера из чередующихся тетраэдров кремния и алюминия, связанных через атомы кислорода [21; 22]. Заполнителями в геобетонах являются гранулированные зола уноса и шлак, другие легкие минеральные наполнители и различные виды фибры. Существуют ячеистые геобетоны. Преимуществами геобетонов являются прочность, морозостойкость, низкое водопоглощение за счет мелкопористой структуры, химическая стойкость, негорючесть, эластичность, низкая усадка и быстрое твердение. Геобетоны применяются в монолитном и монолитно-блочном строительстве для получения несущих и ограждающих конструкций.

К энергоэффективным материалам и изделиям также можно отнести:

– термопрофили (перфорированные профили), представляющие собой швеллеры из тонкой оцинкованной стали и имеющие перфорацию в виде узких продольных отверстий (просечек), расположенных в шахматном порядке несколькими рядами на широкой плоскости швеллера. Благодаря перфорации во время теплопередачи через термопрофиль потоку тепла приходится огибать отверстия, что повышает тепловое сопротивление профиля, и он перестает быть мостиком холода. Термопрофили применяются для сооружения легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), применяемых в качестве каркаса для быстровозводимых малоэтажных зданий или для внутренних ограждающих конструкций. Преимуществами каркасов из ЛСТК являются легкость, точность размеров и отсутствие усадки. Недостатками таких каркасов являются низкая несущая способность, необходимость звукоизоляции, потеря жесткости под воздействием высоких температур при пожаре;

– стеклопластиковые и базальтопластиковые арматура и гибкие связи (стержни-анкеры для подвижного соединения облицовочного и несущего слоев сквозь слой утеплителя в трехслойных стенах), которые в отличие от стальных аналогов позволяют избежать возникновения мостиков холода. Кроме того, композитные арматура и гибкие связи характеризуются сочетанием прочности и легкости, химической стойкостью. Недостатками данных изделий являются низкий модуль упругости, потеря прочности при пожаре из-за низкой термостойкости, невозможность сварки;

– энергоэффективные стекла и светопрозрачные конструкции, которые задерживают инфракрасное излучение внутри здания и препятствуют проникновению ультрафиолетового излучения извне. К этой группе относятся двойное, тройное и четверное остекление, низкоэмиссионные стекла (селективные стекла с металлооксидными покрытиями, которые обладают светопропускающей способностью, но отражают обратно внутрь здания тепловой поток), электрохромные стекла (стекла с возможностью изменения светопропускания и защиты от ультрафиолетового излучения за счет пропускания через них электрического тока), стекла с фотоэлектрическим эффектом (стекла с полупрозрачными покрытиями, позволяющими преобразовывать солнечную энергию в электрическую), рамные конструкции, в которых пространство между стеклами заполнено аэрогелем

(пенообразный материал, состоящий на 4% из силикона и на 96% из воздуха), инертными газами с низкой теплопроводностью, такими как аргон, ксенон и криптон, или в этом пространстве создано разрежение (вакуумные стеклопакеты), а также рамные конструкции из композитных материалов: стеклопластика, комбинаций стеклопластика, поливинилхлорида и древесных опилок [24; 25];

– применение фазопереходных веществ (парафинов, жирных кислот, гидратов солей), в т.ч. в микрокапсулированном виде, для нанесения на строительные конструкции, добавления в состав строительных материалов (керамики, бетонов и других вяжущих, лакокрасочных материалов) и применения в качестве засыпки для пустотелых и многослойных изделий. Фазопереходные вещества аккумулируют тепло при нагреве и отдают при охлаждении (при переходе из твердого состояния в жидкое и обратно) [26–28].

Заключение

Таким образом, в настоящее время существует большое количество энергоэффективных материалов и изделий, из которых могут быть выполнены внутренние и внешние несущие и ограждающие строительные конструкции, что позволяет решать вопросы энергосбережения при эксплуатации малоэтажных и высотных зданий и сооружений. При этом ассортимент энергоэффективных строительных материалов и изделий постоянно расширяется. В настоящее время такие материалы в большинстве случаев обладают прочностью, недостаточной для формирования ответственных несущих частей крупного строения, и применяются только в малоэтажном строительстве или как теплоизоляционные слои при высотном строительстве, или для них характерны низкие показатели стойкости к воздействию внешних факторов, что является причиной обязательной наружной облицовки. В связи с этим актуальными задачами разработки энергоэффективных конструктивных и облицовочных изделий являются повышение прочности, в первую очередь на изгиб, снижение теплопроводности, повышение атмосферостойкости и влагостойкости, а также снижение стоимости.

Список литературы

1. Nadesan M.S., Dinakar P. Structural concrete using sintered flyash lightweight aggregate: A review. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 154. P. 928–944.
2. Данилин Л.Д., Дрожжин В.С., Куваев М.Д., Куликов С.А., Максимова Н.В., Малинов В.И., Пикулин И.В., Редюшев С.А., Ховрин А.Н. Полюе микросферы из золуноса – многофункциональный наполнитель компози-

онных материалов // Цемент и его применение. 2012. № 4. С. 100–105.

3. Oreshkin D., Semenov V., Rozovskaya T. Properties of Light-weight Extruded Concrete with Hollow Glass Microspheres. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. P. 638–643.

4. Siddique R., Singh M., Mehta S., Belarbi R. Utilization of treated saw dust in concrete as partial replacement of natural sand. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261. Article 121226. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121226.

5. Королева К.Е. Современные экологичные виды бетонов // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2020. Т. 2. С. 250–254.

6. Ammari M.S., Belhadj B., Bederina M., Ferhat A., Quéneudec M. Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 233. Article 117374. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117374.

7. Jami T., Karade S.R., Sing L.P. A review of the properties of hemp concrete for green building applications. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 239. Article 117852. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.117852.

8. Raheem A.A., Ikotun B.D. Incorporation of agricultural residues as partial substitution for cement in concrete and mortar – A review. *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 31. Article 101428.

9. Жуков А.Д., Румянцев Б.М. Строительные системы. В 3 ч. Часть 2. Наружные системы облицовки и изоляции: учебное пособие. М.: Изд-во МГСУ, 2015. 432 с.

10. 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.

11. Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Применение полимерных и стекольных отходов для получения самоглазующей облицовочной керамики // Экология и промышленность России. 2019. № 11. С. 38–42.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Тарабукина С.Ю., Симанкина Т.Л., Кирилкина А.А. Эффективность теплоблока в качестве наружной ограждающей конструкции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 3. С. 47–62.

17. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение: учебник для среднего профессионального образования. 4-е изд., перераб. и доп. В 2 ч. Часть 1. М.: Юрайт, 2019. 275 с.

18. Бакунов В.С., Кочетков В.А., Надденный А.В., Черепанов Б.С., Шелков Е.М. Многофункциональный керамический строительный материал – керпен // Строительные материалы. 2004. № 11. С. 10–11.

19. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Утилизация керамических и полимерных отходов в производстве облицовочных композиционных материалов // Экология и промышленность России. 2019. № 7. С. 36–41.

20. Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Разработка способа получения облицовочного композиционного материала на основе полимерных и стекольных отходов // Экология промышленного производства. 2018. № 3. С. 2–6.

21. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лисейцев Ю.Л., Пезин Д.Н., Зеленский И.Р., Смоляков А.К., Хроменок Д.В. Разработка фибробетонов на бещементных вяжущих // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 1. С. 124–130.

22. Фаликман В.Р., Охотникова К.Ю. Геополимерные вяжущие и бетоны в современном строительстве // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 4-1. С. 93–97.

23. Zhang P., Gao Z., Wang J., Guo J., Hu S., Ling Y. Properties of fresh and hardened fly ash/slag based geopolymer concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 270. Article 122389.

24. Ахмяров Т.А., Спиридонов А.В., Шубин И.Л. Энергоэффективные вентилируемые светопрозрачные ограждающие конструкции // Энергосбережение. 2014. № 8. С. 62–65.

25. Давыдова Е.И., Гнам П.А., Тарасова Д.С. Светопрозрачные конструкции и методы повышения их энергоэффективности // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 5. С. 112–128.

26. Rathore P.K.S., Shukla S.K., Gupta N.K. Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: A critical review. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 53. Article 101884. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101884.

27. Аймбетова И.О., Сулейменов У.С., Камбаров М.А., Калшабекова Э.Н., Риставлетов Р.А. Теплофизические свойства фазопереходных теплоаккумулирующих материалов, применяемых в строительстве // Успехи современного естествознания. 2018. № 12–1. С. 9–13.

28. Левина Ю.С., Усачев С.М., Усачев А.М. Получение энергосберегающих строительных материалов на основе традиционного сырья и теплоаккумулирующих добавок // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 4–2. С. 124–126.