**Береговой, Виталий Александрович. Эффективные пенокерамобетоны общестроительного и специального назначения : диссертация ... доктора технических наук : 05.23.05 / Береговой Виталий Александрович; [Место защиты: ГОУВПО "Пензенский государственный университет архитектуры и строительства"].- Пенза, 2012.- 421 с.: ил.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

На правах рукописи

**05201350200**

Береговой Виталий Александрович

**ЭФФЕКТИВНЫЕ ПЕНОКЕРАМОБЕТОНЫ  
ОБЩЕСТРОИТЕЛЬНОГО И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность 05.23.05 - Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, советник РААСН Королев Е.В.

**Пенза, 2012**

[ВВЕДЕНИЕ 5](#bookmark5)

[ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА 15](#bookmark7)

1 Л. Общие сведения о пеностеклокерамических материалах: мировой опыт про- 15 изводства и современные тенденции

1Л Л. Патентные исследования 15

1Л.2. Результаты научных исследований и научно-техническая информация 22 1Л .3. Тенденции развития технологий пеностеклокерамических материалов 26

1. [Технологические предпосылки создания эффективных пенокерамобетонов 29](#bookmark11)
2. [Материалы для производства пенокерамобетонов 35](#bookmark12)
3. [Минеральная сырьевая база 3 5](#bookmark13)
4. [Пенообразователи и корректирующие добавки 42](#bookmark16)
5. [Технологические особенности процессов формирования ячеистой структуры 62](#bookmark21)
6. [Современные подходы к исследованию взаимосвязи состава и свойств по- 67](#bookmark22)

ристых композиционных материалов

1. [Прочностные свойства 67](#bookmark23)
2. [Теплофизические свойства 71](#bookmark26)

[Выводы 76](#bookmark37)

ГЛАВА 2. ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 78

* 1. Цели и задачи исследования 78
  2. [Применяемые материалы и их характеристики 78](#bookmark39)
  3. [Методы исследований и аппаратура 83](#bookmark40)
  4. Статистическая оценка результатов измерений и методы 88

математического планирования эксперимента

* 1. [Методика приготовления образцов пенокерамобетона 89](#bookmark44)

в лабораторных условиях

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДА- 90

НИЯ ПЕНОКЕРАМОБЕТОНОВ РАЗЛИЧНОГО

НАЗНАЧЕНИЯ

1. [Критерии качества ПКБ различного назначения 90](#bookmark47)
2. [Методики выбора компонентов и проектирования составов ПКБ 100](#bookmark48)
3. [Теоретические основы выбора оптимального модификатора 100](#bookmark49)
4. Метод определения фазового соотношения ПКБ по химическому соста- 103 ву компонентов
5. Методики оценки параметров состояния и структурных показателей ПКБ по 112 критерию теплопроводности
6. [Расчет теплопроводности жаростойких ПКБ 113](#bookmark56)
7. Расчет теплопроводности пенокерамобетонов общестроительного на- 120 значения
8. Методика оценки структурных показателей ПКБ по критерию прочности 128
9. [Методика оценки рецептурных факторов по критерию усадки 135](#bookmark77)
10. [Алгоритм конструирования ПКБ 141](#bookmark81)

[Выводы 148](#bookmark82)

ГЛАВА 4. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА- 151 ОСНОВЫ

1. [Исследование процессов формирования ячеистой структуры 151](#bookmark84)
2. Влияние минеральных компонентов на свойства пеноминеральных сме- 151 сей
3. Влияние рецептурных факторов на реологические свойства сырьевых 157 смесей
4. Исследование влияния пенообразователей на гидратацию вяжущих и проч- 164 ность материала-основы
5. [Влияние пенообразователей на гидратацию цементов системы СаО- 164](#bookmark89)

А1203

1. [Влияние пенообразователей на гидратацию цементов системы СаО- 176](#bookmark92)

Si02

1. Исследование адсорбции пенообразующих добавок и органических пласти- 181 фикаторов на поверхности минеральных частиц
2. [Исследование влияния природных сырьевых компонентов на свойства пен 187](#bookmark94)
3. [Влияние минерального типа 191](#bookmark95)
4. [Влияние лиофильных показателей 194](#bookmark96)
5. [Влияние химического состава 203](#bookmark99)
6. [Влияние модификаторов на свойства пенокерамобетонных смесей 209](#bookmark100)
7. [Добавки-стабилизаторы 209](#bookmark101)
8. [Влияние органических пластификаторов 212](#bookmark102)
9. [Влияние неорганических пластификаторов 216](#bookmark103)
10. [Синергетизм пластификаторов 229](#bookmark108)
    1. [Перечень рекомендуемых модификаторов 232](#bookmark109)

[Выводы 235](#bookmark110)

[ГЛАВА 5. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПЕНОКЕРАМОБЕТОНОВ 238](#bookmark111)

1. [Кремнистые пенокерамобетоны общестроительного назначения 238](#bookmark112)
2. [Структурообразование материала-основы 238](#bookmark113)
3. Выбор добавок-модификаторов 247
4. Определение оптимальных параметров макроструктуры 5.2. Жаростойкие пенокерамобетоны
5. Структурообразование материала-основы















1. 





















1. Влияние материала-основы на термомеханические свойства
2. Теплофизические свойства Выводы

ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ПЕНОКЕ- РАМОБЕТОНОВ

1. Технология жаростойких пенокерамобетонов
2. Основные сырьевые компоненты и требования к ним
3. Принципиальная технологическая схема
4. Промышленная апробация
5. Расчет и конструирование технологических аппаратов
6. Технология пенокерамобетонов общестроительного назначения
7. Основные сырьевые компоненты и требования к ним
8. Промышленная апробация
9. Технико-экономическое обоснование производства и применения ПКБ
10. Жаростойкие пенокерамобетоны
11. Пенокерамобетоны общестроительного назначения Выводы

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Принятые обозначения и сокращения**

ВГЦ - высокоглиноземистый цемент;

ОПОС - отход производства оптического стекла;

ММПЭ - методы математического планирования эксперимента; ПКБ - пенокерамобетон;

ПКБЖ - пенокерамобетон жаростойкий;

ПКС - пенокерамобетонный сырец;

ПЦ - портландцемент;

ПЦ (к) - молотый портландцементный камень;

ППЦ - пуццолановый портландцемент;

ПО - пенообразователь;

ШПЦ -шлакопрортландцемент.

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность.**

Анализ современной проблематики строительного материаловедения показы­вает, что введение новых норм по теплозащите зданий и сооружений послужило стимулом для стремительного развития технологии производства теплоизоляцион­ных материалов. За последние годы были разработаны полимерные и минеральные теплоизоляционные материалы, обладающие высокими технико-экономическими показателями, внедрены прогрессивные отечественные и зарубежные технологии их изготовления.

Однако современные положительные тенденции в технологии теплоизоляци­онных материалов практически не затронули «пенную технологию», которая, имея потенциалы прогрессивности, конкурентоспособности и экономичности, способна обеспечить значительные сдвиги в решении задач снижения материалоемкости строительной продукции, экологии, расширения сырьевой базы для производства эффективных теплоизоляционных материалов. Несмотря на очевидные технологи­ческие преимущества, способ пенообразования применяется сравнительно редко, что обусловлено недостаточной проработкой научно-практических основ получе­ния пеноминеральных материалов. В настоящее время отсутствуют общие методо­логические принципы, основанные на системном подходе к исследованию процес­сов структурообразования, рассматривающие проектирование составов с учетом

взаимозависимости факторов триады «материал-конструкция-эксплуатационная среда» и содержащие математический аппарат с необходимым набором теоретиче­ских и инженерных расчетных зависимостей, позволяющих осуществлять управле­ние технологическими процессами получения ячеистого материала с заданными свойствами.

Изложенное позволяет констатировать, что существует объективная необхо­димость решения комплекса материаловедческих задач, направленных на совер­шенствование технологии получения пеноминеральных теплоизоляционных мате­риалов с целью реализации имеющегося резерва повышения качества и расшире­ния области их рационального применения. ■

Необходимо отметить, что в отечественной практике имеются положительные примеры производства достаточно эффективных ячеистых материалов на мине­ральной основе, например из пенокерамики или пеностекла. Однако процесс по­лучения таких материалов предусматривает использование пенообразователей на основе дефицитного природного или белкового сырья, что, наряду с большой энер­гоемкостью производственного цикла и ограниченностью минеральной сырьевой базы, является существенным недостатком существующих технологий производст­ва ячеистых обжиговых материалов. Кроме того, кремнистая пенокерамика харак­теризуется повышенной сорбционной способностью, ограничивающей область ее рационального применения производством жаростойких материалов, а пеностекло - недостаточной для большинства типов ограждающих конструкций жилых зданий воздухо- и паропроницаемостью.

Таким образом, очевидна актуальность исследований, направленных на раз­работку составов и технологии изготовления эффективных ячеистых композитов, обладающих положительными качествами пенобетонов (доступность технологиче­ского оборудования и возможность использования синтетических пенообразовате­лей), пенокерамики (отсутствие усадочных деформаций, долговечность, достаточ­ная паропроницаемость; возможность использования в качестве основного компо­нента доступных горных пород) и пеностекла (низкая сорбционная способность).

Один из возможных путей повышения качества и конкурентоспособности об­жиговых пенных материалов заключается в разработке гибридной технологии их изготовления, в которой рационально совмещены технологические подходы, ис­пользуемые при изготовлении пенобетонных и пенокерамических материалов. Суть рассматриваемой технологии заключается в том, что на первом этапе, исполь­зуя технологию пенобетона, получают малоцементный материал (ячеистый сырец) с коагуляционно-конденсационным типом микроструктуры. На втором этапе про­изводится обжиг цементного сырца, в процессе которого протекает комплекс фи- зико-химических процессов, связанных с термической активизацией основного ми­нерального сырьевого компонента из алюмосиликатных или кремнистых горных пород. Высокотемпературная обработка способствует увеличению количества це­ментирующего вещества, повышению компактности упаковки микрочастиц и уда­лению из системы пенообразующей добавки. В процессе обжига формируется но­вый фазовый состав и микроструктура матричного вещества, а сам ячеистый мате­риал, переходя на новый более высокий уровень качества, трансформируется в пе- нокерамобетон (ПКБ).

Теплопроводность, как способность строительных материалов оказывать тер­мическое сопротивление на пути прохождения теплового потока, имеет огромное значение, предопределяя их функциональное назначение в конструкциях зданий и сооружений. Знание закономерностей формирования важнейших теплофизических констант (теплопроводности, теплоемкости, термического расширения, термостой­кости) позволяет повысить качество материалов и более надежно прогнозировать их работу в условиях эксплуатации, что является актуальной задачей в свете дос­тижения объявленных правительством РФ целей по повышению энергоэффектив­ности современного строительства.

Большинство ТУ и ГОСТов на стеновые и теплоизоляционные материалы нормируют как теплопроводность, так и прочность изделий. Даже теплоизоляци­онные материалы, не воспринимающие никаких значимых нагрузок, должны иметь прочность, достаточную для их транспортировки, монтажа и последующего ремон­та в процессе эксплуатации. При этом совмещение требований низкой теплопро­водности и достаточной прочности в одном материале является сложной научно­практической задачей, решение которой может быть найдено путем рационального совмещения уже существующих технологий и разработки новых научно­методических подходов к этой проблематике.

Композиционные материалы, по сути, представляют собой конгломераты, со­стоящие из мелкодисперсных частиц, формирующих микроуровень и частиц более крупных размеров, формирующих макроуровень. Микроструктурный уровень соз­дается в результате затвердевания вяжущего, наполнителей и других мелкодис­персных добавок. Применительно к теплоизоляционным материалам макроуровень обозначают терминами «матрица» или «материал-основа». В качестве компонента, формирующего макроуровень ячеистого материала, принято рассматривать газооб­разную фазу, параметры которой определяют как прочностные, так и теплопрово­дящие показатели искусственного конгломерата. Основными параметрами газовой фазы являются средний размер, равномерность распределения, степень замкнуто­сти, характер внутренней поверхности, геометрический фактор формы.

В целях получения расчетных зависимостей при исследовании механизма формирования показателей теплоизоляционного материала, состоящего из большо­го количества компонентов, часто применяют полиструктурный подход. В рамках этого подхода аналитические закономерности можно получить, последовательно рассматривая отдельные структурные уровни материала, каждый из которых со­стоит из относительно небольшого числа компонентов. Причем компоненты счи­таются однородными во всем объеме материала и их свойства оцениваются по ус­редненным показателям.

Следуя полиструктурному подходу, ячеистый материал можно представить как двухкомпонентную систему, включающую материал-основу и газовые ячейки. При этом отдельные свойства такого материала можно рассматривать в виде функ­ции от соответствующих показателей и количественного соотношения компонен­тов. Например, исследование теплопроводности материала-основы пенокерамобе- тона следует проводить, представляя материал, состоящим из двух фаз - кристал­лической и стеклообразной. В процессе детального исследования можно постепен­но перейти к рассмотрению теплопроводности отдельных фаз и их теоретическому определению. Полиструктурное моделирование материалов является достаточно общепризнанным и широко применяется при исследовании свойств, как традици­онных бетонов, так и вновь создаваемых композитов с заранее заданными показа­телями свойств.

Одной из главных задач настоящей работы являлось выработка научно­практических основ пенокерамобетонной технологии с целью повышения качества обжиговых теплоизоляционных материалов. В результате используемого техноло­гического подхода формируется заданный минерально-фазовый состав пеностек­локерамического материала, оптимизированный по механическим, теплофизиче­ским и гидрофизическим свойствам.

В практической плоскости работа направлена на создание инновационного про­изводства пеностеклокерамических строительных материалов с высокими технико­экономическими показателями, достигаемыми за счет использования природного материала (опок, глин, диатомитов), корректирующих добавок и управляющих тех­нологических воздействий.

Диссертационная работа выполнена в рамках тематического плана госбюд­жетных НИР Федерального агентства по образованию РФ, проводимых по зада­нию Министерства образования РФ и финансируемых из средств федерального бюджета на 2003...2008 гг., госбюджетных тем, финансируемых РААСН (2004...2006 гг.), совместной Межотраслевой программы сотрудничества Миноб­разования РФ и Спецстроя РФ (2003 г.), гранта на проведение НИР в рамках феде­ральной целевой программы по поддержке малых предприятий в научно­технической сфере (2005...2006 гг.), гранта министерства регионального развития РФ (г. Пенза, 2010 г.), а также ряда исследовательских работ, выполненных по за­казам строительных предприятий Пензенской области (2006-2011 гг.).

**Научная новизна** работы заключается в теоретическом обосновании процес­са получения, установлении общих закономерностей формирования структуры и критериев для ее оценки, прогнозировании свойств пеностеклокерамических мате­риалов (пенокерамобетонов) из модифицированных полиминеральных смесей на основе пластичного и непластичного природного сырья в сочетании с цементными технологическими связками и синтетическими пенообразователями.

Основные научные результаты, полученные при выполнении диссертацион­ных исследований, состоят в следующем:

1. Разработаны методологические основы получения высококачественных

строительных композитов по технологии пенокерамобетона,



направленное формирование параметров стеклокерамической микроструктуры обжигового материала из пеноминеральных смесей, стабилизированных добавка­ми цементных вяжущих в количестве 10... 15 %. Показано, что применение моди­фицирующих добавок на основе ряда неорганических солей и органических пла­стификаторов положительно влияет на технико-эксплуатационные характеристики получаемого материала (снижается теплопроводность на 10... 15 % (в сухом со­стоянии), уменьшается сорбционное увлажнение в 1,8...3,0 раза, увеличивается прочность при сжатии в 2,5...3,0 раза по отношению к базовым составам).

1. Обоснованы режимы обжига пенокерамобетонов различного назначения, позволяющие сформировать минерально-фазовый состав материала с заданным комплексом тепло- и гидрофизических, а также механических свойств в интервале температур 900...950 °С (для общестроительных модификаций), 1230...1250 °С (для жаростойких модификаций). Показано, что использование подобранных мо­дифицирующих добавок интенсифицирует процесс образования эвтектик требуе­мого состава и обеспечивает повышение технико-эксплуатационных характери­стик получаемого материала за счет формирования при охлаждении заданного ко­личества (от 15 до 40 %) прочных, низкотеплопроводных и малогигроскопичных стекловидных фаз.
2. Установлено влияние рецептурных факторов на реотехнологические свой­ства сырьевых смесей: разработанные добавки значительно (в 2,5...4 раза) снижа­ют их вязкость и способствуют уменьшению общей водопотребности вспенивае­мых масс на 25.. .30 %.
3. Выявлены закономерности адсорбции при совместном введении синтетиче­ских пенообразователей и органических пластификаторов; доказано наличие ме­ханизма конкурирующей адсорбции молекул пенообразователя и пластификатора на поверхности частиц цементной технологической связки. Разработана методика выбора пенообразователя по критериям кратности и стойкости пен, а также проч­ности пенокерамобетонного сырца.
4. Установлены закономерности влияния сырьевых компонентов пенокерамо- бетона на кратность и стойкость пен. Разработаны критерии отбора природных компонентов, включающие оценку их химического и минералогического состава, а также гидрофильных и электрокинетических свойств.
5. Сформулированы принципы подбора составов полифункциональных доба­вок, сочетающих водоредуцирующий и воздухововлекающий эффекты с положи­тельным влиянием на процессы спекания материала межпоровых перегородок, формирования состава и свойств образующихся стекловидных фаз.
6. Установлены основные закономерности формирования минерально­

фазового состава пенокерамобетона; выявлено, что в процессе термической обра­ботки продукты дегидратации цементного камня активно взаимодействуют с при­родными компонентами сырьевой смеси с образованием упрочняющих кристалли­ческих фаз - волластонита, плагиоклаза. При этом свободный оксид кальция, об­разующийся на начальных ступенях обжига, полностью расходуется на обеспече­ние процесса синтеза указанных кристаллических соединений и водостойких стек­ловидных фаз. .

1. С использованием феноменологического подхода разработаны расчетные методы определения теплопроводящих и прочностных свойств пенокерамобетона, учитывающие свойства основных фаз, а также параметры ячеистой структуры; предлагаемый метод расчета теплопроводности позволяет производить адекват­ный прогноз этого важнейшего показателя пенокерамобетона с учетом заданных температурно-влажностных условий эксплуатации.
2. Установлены основные закономерности влияния рецептурно­технологических факторов на физико-технические свойства разработанных пено- керамобетонов. Подобраны режимы температурной обработки, позволяющие эф­фективно управлять процессами формирования микроструктуры пенокерамобето­на и обеспечивающие достижение требуемого уровня эксплуатационных показате­лей материала.
3. Разработан метод проектирования составов пенокерамобетонов различно­го назначения с заданными свойствами, учитывающий химико-минералогический состав сырьевых компонентов, их влияние на процесс получения пеноминераль­ных масс, термическое спекание материала межпоровых перегородок и формиро­вание стеклокристаллической микроструктуры.

**Практическое значение работы:**

1. Разработаны реализуемые на практике научно-практические основы техно­логии изготовления пенокерамобетонов с улучшенными эксплуатационными по­казателями по сравнению с существующими видами пенокерамики.
2. Найдены технологические решения, позволившие существенно расширить минерально-сырьевую базу для производства пеностеклокерамических материалов за счет применения в качестве основного компонента доступного и широко рас­пространенного природного сырья из опалкристобалитовых или алюмосиликат­ных горных пород.
3. Установлено оптимальное сочетание требуемых строительно-технических характеристик пенокерамобетонов на основе модифицированного опочного или глинистого сырья в зависимости от назначения материала и **условий** его эксплуа­тации.
4. С использованием технологии пенокерамобетона определены режимы по­лучения строительных материалов следующего функционального назначения:

* **общестроительные:** *теплоизоляционные* со средней плотностью 300...350 **kt/mj,** теплопроводностью не более 0,085 Вт/(м-°С), прочностью при сжатии 1,3... 1,5 МПа и сорбционным увлажнением до 4,5 %;

*конструкционно-теплоизоляционные* со средней плотностью 450... 1100 кг/м"5, прочностью при сжатии 1,8...12 МПа, теплопроводностью 0,11...0,19 Вт/(м-°С) и сорбционным увлажнением до 4,1 %;

* **жаростойкие:** со средней плотностью 350...450 **kt/mj,** прочностью при сжа­тии 1,1... 1,5 МПа, термостойкостью 15 циклов, теплопроводностью 0,09...0,12 Вт/(м-°С) и температурой эксплуатации до 1250 °С.

1. Разработаны нормативные и регламентирующие документы для производ­ства и применения пенокерамобетонов из опочного сырья: технические условия ТУ 575400-001-68365026-11 «Изделия и материалы из пенокерамобетона»; конст­руктивные решения ограждающих конструкций с использованием изделий из пе­нокерамобетона внедрены в проектную практику ОАО «Гражданпроект».
2. Произведена компоновка оборудования в технологическую линию по про­изводству пенокерамобетонов, разработаны требования к основным механизмам, применяемому сырью и технологическим режимам.

**Реализация результатов исследований.** Основные положения и полученные результаты использованы при разработке и проектировании опытно­промышленных линий по производству пеноминеральных строительных материа­лов на ОАО «Стройдеталь №2» (г. Пенза), ООО «Новые технологии» (г. Пенза), ООО «Пенокерамобетон» (г. Пенза) для объектов гражданского и теплоэнергети­ческого строительства.

В период с 2006 по 2011 гг. на производственной базе ООО «Новые техноло­гии» налажен промышленный выпуск жаростойких изделий из полученных соста­вов для внутренней футеровки печей термической обработки стальных деталей. Выпускаемые изделия имеют размеры 250х 120><60 мм и характеризуются макси­мальной температурой эксплуатации 1250 °С.

Практические результаты проведенных исследований внедрены в производ­ство на ООО «Пенокерамобетон», ООО «ПБКомпозит», ООО «Новые техноло­гии». Полученные материалы рекомендованы ОАО «Гражданпроект» для исполь­зования в строительстве в виде конструктивных решений ограждающих конструк­ций с применением теплоизоляционных пенокерамобетонов.

Результаты исследований, проведённых в рамках диссертационной работы, составили основу инновационных разработок: проекта «Новые композиционные ячеистые материалы с улучшенными технико-экономическими показателями для объектов жилищного и теплоэнергетического строительства», победившего в кон­курсе «Старт» в рамках ФЦП по поддержке инноваций в научно-технической сфе­ре (Москва, 2005 г.); проекта «Разработка и создание инновационной технологии производства пенокерамобетонов с использованием минерального сырья Пензен­ской области для строительства энергоэффективных зданий», победившего в ре­гиональном конкурсе инновационных проектов (г. Пенза, 2010 г.).

В 2012 году на основании проведенного конкурсного отбора результаты ис­следований были признаны инновационно-значимыми и получили поддержку вен­чурного фонда Пензенской области. В настоящее время ОАО «Пензенский регио­нальный фонд поддержки инноваций» осуществляет финансирование работ по внедрению разработанных пенокерамобетонов и сопутствующих изделий в опыт­но-промышленное производство.

Теоретические и экспериментальные результаты исследований используются в учебном процессе по дисциплинам «Материаловедение. Технология конструк­ционных материалов», «Строительные материалы», «Методы и средства научных исследований» для студентов, обучающихся по направлению 270800 «Строитель­ство».

**Апробация работы.** Основные положения работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских научно-практических конференциях, в том чис­ле:

* научно-практической конференции по результатам реализации в 2003 г. Межотраслевой программы сотрудничества Минобразования РФ и Спецстроя РФ «Наука, инновации, подготовка кадров в строительстве» (Москва, МГСУ, 2003 г.);
* VIII Академических чтениях РААСН «Современное состояние и перспекти­вы развития строительного материаловедения» (Самара, СГАСУ, 2004);
* X Академических чтениях РААСН «Достижения, проблемы и перспектив­ные направления развития теории и практики строительного материаловедения» (Пенза-Казань, ПГУАС-КГАСУ, 2006 г.);
* международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современного строительства» (Пенза, ПГУАС, 2005 и 2007 г.);
* международном конгрессе SIB-08 «Наука и инновации в строительстве» (Воронеж, ВГАСУ, 2008 г.);
* VI и VII Международных конгрессах по бетонам и конструкциям «Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities» и «Concrete: constructions sustainable option», проходивших в 2005 и 2008 гг. (Великобритания, Университет г.Данди).

В рамках разрабатываемого направления аспирантами под руководством автора защищены две диссертации на соискание ученой степени кандидата техн.наук.

Результаты выполненных исследований, образцы пенокерамобетонов и изделия из них демонстрировались и удостоились: дипломов РААСН в конкурсе на лучшие научные и творческие работы в области строительных наук (Москва, 2001 и 2004 г.); диплома Лейпцигской международной строительной выставки «Baufach» (Лейпциг, 2002 г.); диплома конкурса, учреждённого правительством Республики Татарстан в номинации «Лучшие инновационные разработки, привлекательные для реализации на территории Республики Татарстан» (Москва, ВВЦ, 2007 г.); ди­плома Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Москва, ВВЦ,

1. г.); золотых медалей Всероссийского выставочного центра на III и VIII Мос­ковских международных форумах инноваций и инвестиций (Москва, ВВЦ, 2003 и
2. г.), бронзовой медали II Всероссийского форума «Российским инновациям - российский капитал» (Саранск, 2009 г.); научной стипендии Губернатора Пензен­ской области (2003 г.); Благодарственного письма Губернатора Пензенской облас­ти (2012 г.).

**На защиту выносятся следующие положения:**

- принципы создания высококачественных пенокерамобетонов, основанные на направленной модификации материала-основы с целью формирования мине­рально-фазового состава с заданным комплексом теплофизических и прочностных свойств;

* закономерности структурно-фазовых изменений, происходящих в условиях пирогенного синтеза минерально-фазового состава пенокерамобетона с установле­нием рациональных границ варьирования основных рецептурных и технологиче­ских факторов; результаты экспериментальных исследований и математические модели влияния рецептурных факторов и технологических параметров на структу­ру и свойства получаемых материалов;
* прикладные основы для разработки оптимальных составов различных видов пенокерамобетона с заданными свойствами, включающие методы проектирования пенокерамобетонов различного назначения с учетом химико-минералогического состава сырьевых компонентов, а также методы прогнозирования изменения теп­лоизолирующих свойств при эксплуатации; критерии подбора сырьевых компо­нентов с учетом их влияния на свойства минерализованных пен и материала;
* оптимальные составы и технология производства эффективных теплоизоля­ционных, конструкционно-теплоизоляционных и жаростойких пенокерамобето­нов; результаты исследования эксплуатационных свойств разработанных материа­лов (прочностные свойства, стойкость к термическим циклам, теплопроводность);
* результаты внедрения в производство, а также опытно-промышленных ис­пытаний разработанных материалов.

**Достоверность и объективность** результатов исследований обеспечивается использованием методически обоснованного комплекса структурно­чувствительных методов анализа (рентгенографического, электрокинетического, химико-аналитического, ИК-спектрометрического, фотоэлектроколориметрическо­го, микроскопического), современных средств измерений, статистической обра­боткой результатов, а также совпадением экспериментальных и расчетных данных.

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 104 рабо­тах, в том числе 16 статьях в профильных рецензируемых научных журналах, ре­комендованных ВАК РФ, 6 статьях в рецензируемых зарубежных научных изда­ниях. Результаты исследований обобщены в 6 научных монографиях. Новизна на­учно-технических решений подтверждена 6 патентами РФ на изобретения.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введе­ния, 6 глав, основных выводов, списка использованных источников и приложений. Она содержит 388 страниц машинописного текста, в том числе 168 рисунков и 94 таблицы. Библиография включает 242 наименования.

Работа выполнена на кафедре «Строительные материалы» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» и в НОЦ по направлению «Нанотехнологии» ФГБОУ ВПО «Московский государст­венный строительный университет».

**Выводы**

1. Выполнено обоснование и разработаны эффективные конструктивные ре­шения рабочих механизмов перемешивающих устройств для получения пенокера- мобетонных смесей. Спроектированы и изготовлены основные узлы опытно­промышленной линии. Разработана и скомпонована опытно-промышленная линия по производству пенокерамобетонов.
2. Исследованы закономерности формирования поровой структуры пеномине­ральных систем с учетом конструктивных особенностей перемешивающего обору­дования.
3. Установлено, что релогические свойства сырьевых смесей значительно влияют на процесс вспенивания материала.
4. Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований позво­лил уточнить существующую методику расчета мощности привода высокоскоро­стных мешалок, применяемых при производстве материалов с использованием ме­тода сухой минерализации пены: повышение точности расчета достигнуто введе­нием в расчетную зависимость для вычисления критерия Рейнольдса коэффициен­та *(К,),* учитывающего конструктивные особенности лопастей мешалки и вид пено­образователя.
5. Получены математические зависимости, позволяющие учесть конструктив­ные особенности мешалки, вид пенообразователя, а также кратность пены и ис­пользовать эти параметры в расчете Reu.
6. В условиях экспериментально-промышленного производства изготовлены ячеистые материалы с улучшенными технико-экономическими показателями для жилищного строительства и жаростойкие легковесы для объектов теплоэнергети­ческого строительства.
7. Проведена успешная промышленная апробация результатов исследований, в рамках инновационного проекта: «Новые композиционные ячеистые материалы с улучшенными технико-экономическими показателями для объектов жилищного и теплоэнергетического строительства. Технология их изготовления с использова­нием местных минеральных ресурсов и техногенных отходов» - победителя кон­курса «Старт 05/06» федеральной целевой программы поддержки инновационных разработок в научно-технической сфере (Москва, 2005 г.).
8. Технико-экономическими расчётами установлено, что применение разрабо­танной методологии проектирования составов ПКБ, основанной на управлении процессами формирования минерально-фазового состава материала, а также ис­пользование доступных и широко распространенных горных пород позволяет по­лучить ячеистые материалы с высоким уровнем конкурентоспособности:

- стоимость разработанных пенокерамобетонов общестроительного назначе­ния на 15 % ниже стоимости неавтоклавных ячеистых бетонов, широко исполь­зуемых в современном строительстве. Получаемый при этом экономический эф­фект от внедрения ПКБ для жилищного строительства связан с уменьшением рас­хода цемента до 40...60 кг на 1 **mj.** Высокая конкурентоспособность разработанных материалов обеспечивается улучшением прочностных и теплофизических свойств, снижением усадочных деформаций. Экономический эффект при использовании опочного пенокерамобетона в сравнении с пенодиатомитом составляет 2,5 млн. руб. на 1 тыс. м3.

* стоимость разработанного жаростойкого пенокерамобетона в 2 раза меньше существующих аналогичных материалов при сопоставимых физико-механических показателях и эксплуатационных затратах. Экономический эффект при использо­вании жаростойкого пенокерамобетона составляет 6,52 млн. руб. на 1 тыс. м3.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

1. С использованием системного подхода разработаны научно­технологические принципы получения ПКБ, установлены закономерности созда­ния и улучшения качества пенокерамобетонов на основе широко распространен­ных алюмосиликатных и кремнистых осадочных горных пород путем направлен­ного формирования минерально-фазового состава и поровой структуры материала с учетом оптимизации рецептурно-технологической системы по критериям: «тем­пература спекания», «прочность» и «теплопроводность».

Разработана и обоснована методология исследования зависимостей «состав- свойство» для решения оптимизационных задач, возникающих при проектирова­нии ПКБ с заранее заданными свойствами.

1. Проведенными исследованиями установлено:

* незначительное количество (10... 15 %) гидравлического вяжущего, вводимо­го в состав ячеистого материала в качестве технологической связки, обеспечивает достаточную прочность пенокерамобетонному сырцу, а в процессе термической обработки является реакционно-активным веществом, продукты гидратации (де­гидратации) которого вступают во взаимодействие с алюмосиликатными и кремни­стыми компонентами сырьевой смеси и формируют кристаллические фазы, упроч­няющие структуру пенокерамобетона;
* эффективное управление процессами формирования фазового состава мате­риала и повышение качества ПКБ достигается за счет выбора вида цемента и кор­ректирующих добавок, способствующих образованию легкоплавких эвтектик и по­лучению высокопрочных и малотеплопроводных стекловидных фаз.

1. Разработан метод проектирования составов ПКБ на основе принципа фор­мирования требуемого фазового состава межпоровых перегородок и доминирую­щего влияния свойств материала-основы на важнейшие эксплуатационные показа­тели пористого материала. В предлагаемом методе используются расчетные зна­чения теплофизических и прочностных характеристик ПКБ, полученные с учетом свойств материала-основы, структурных показателей и условий эксплуатации (температура, влажность и др.).
2. Предложены рецептурно-технологические решения, позволяющие сущест­венно улучшить качество пенокерамобетонов на основе рассмотрения и экспери­ментального изучения механизма формирования и проявления в процессе эксплуа­тации изделий теплопроводящих и прочностных свойств, а также влажностной усадки, гигроскопичности, термостойкости, плотности, параметров порового про­странства.
3. Сформулированы критерии оценки качества керамического сырья примени­тельно к пенокерамобетонам. Для обеспечения устойчивости пенокерамобетонной массы рекомендуется использовать природные минеральные компоненты, имею­щие следующие показатели: дзета-потенциал от -13,5 mV и выше; коэффициент гидрофильности более 3,5; отсутствие в составе соединений, насыщающих водный раствор ионами Са2+ и Mg2+свыше 0,05 %; значение pH водного раствора более 8.
4. Впервые установлен характер влияния пенообразователей, комплексных добавок (содержащих пластификаторы, стабилизаторы, плавни), а также вида це­мента на процессы формирования структуры материала-основы ПКБ. Показано, что с использованием синергетического эффекта, возникающего при оптимальном количестве корректирующих добавок, возможно получить материал с заданным комплексом эксплуатационных показателей. Получены количественные значения адсорбции ПО на поверхности частиц минеральной фазы, которые показали, что наименьшей адсорбирующей способностью характеризуются опока (3,0...4,1 мг/г) и диатомит (2,61...9,1 мг/г). Причем величина адсорбции ПО на поверхности час­тиц кремнистых пород в 3...4 раза меньше, чем на поверхности глин. Это разли­чие является одной из причин ухудшения устойчивости пены при ее наполнении некоторыми видами глин.
5. Предложена методика выбора вида и количества пенообразователя, учиты­вающая влияние различных факторов на устойчивость пеномасс, а также на про­цессы схватывания и твердения, материала. Выявлено, что в присутствии пласти­фикатора и стабилизатора наблюдается увеличение концентрации пенообразовате­ля в растворе, позволяющее уменьшить количество вводимого пенообразователя для получения ПКБ требуемой плотности и снизить его негативное влияние на процесс твердения и прочность
6. Установлено, что в качестве добавок-плавней целесообразно использовать натрий-, фтор- и свинецсодержащие компоненты. Экспериментальными исследо­ваниями подтверждено, что введение в состав ПКБ указанных добавок способству­ет значительному увеличению прочности материала-основы ПКБ и сохранению

высоких теплоизолирующих показателей в процессе эксплуатации за счет резкого снижения сорбционного увлажнения материала по сравнению с традиционными ячеистыми бетонами.

1. Показано, что добавки-плавни на основе фосфатов, фторидов и карбонатов натрия не оказывают заметного влияния на свойства ненаполненной пены. Однако при наполнении пен алюмосиликатными компонентами сырьевой смеси ПКБ, ока­зывающими на пену негативное воздействие, введение вышеуказанных добавок способствует повышению устойчивости пеномассы. Установлено, что введение добавок-плавней приводит к увеличению относительного содержания частиц гли­нистых фракций, что благоприятно сказывается на устойчивости вспененных сус­пензий, а также способствует ускорению процесса спекания при температурной обработке. Предложенные добавки обладают полифункциональным действием, что подтверждается исследованиями реологических свойств: помимо улучшения ос­новных эксплуатационных показателей их введение сопровождается воздухововле­кающим и водоредуцирующим эффектами, что позволяет интенсифицировать про­цесс воздухововлечения и снизить влажность ПКБ-сырца.
2. На основании термодинамических расчётов составлена схема возможных минералообразующих процессов, происходящих при обжиге минеральных систем, характерных для составов ПКБ. Методом РФ А установлен фазовый состав пеноке- рамобетонов различного назначения и подтверждено, что после обжига в материа­ле происходит образование минеральных фаз, способствующих получению мате­риала с требуемым комплексом эксплуатационных свойств.
3. С использованием нового рецептурно-технологического подхода разрабо­таны составы пеноминеральных систем на основе кремнистых (опочных) и алюмо­силикатных (глинистых) осадочных горных пород, предназначенные для изготов­ления однослойных и многослойных ограждающих конструкций, применяемых в гражданских зданиях и теплоэнергетических сооружениях.
4. Разработаны составы жаростойких ПКБ и подобраны оптимальные соот­ношения между основными компонентами сырьевых смесей, состоящих из ВГЦ и легкоплавких глин. Получены жаростойкие ПКБ плотностью 400...500 кг/м-5 со следующими показателями свойств: прочность на сжатие до первого нагрева - 0,7... 1,0 МПа, прочность после первого нагрева до температуры 1250 °С - 1,0... 1,4 МПа, термостойкость - 10... 12 циклов воздушных теплосмен.

Разработаны составы теплоизоляционных ПКБ общестроительного назначе­ния и подобраны оптимальные соотношения между основными компонентами сырьевых смесей на основе портландцементных вяжущих (ПЦ, ШПЦ, ППЦ) и кремнистых горных пород.

Получены ПКБ общестроительного назначения плотностью 350...500 кг/м3, характеризующиеся прочностью при сжатии после обжига 0,7... 1,2 МПа, тепло­проводностью 0,095...0,11 Вт/(м-°С), сорбционное увлажнение которых не превы­шает 2 и 4,5 % (соответственно при относительной влажности воздуха 75 и 97 %).

Полученные составы ПКБ имеют более высокие показатели свойств, чем ана­логичные материалы на основе пенодиатомита и неавтоклавного пенобетона.

1. Разработан алгоритм оптимизации составов как материала-основы, так и пенокерамобетонов с использованием полученных регрессионных зависимостей «состав-технологическое воздействие-свойство».
2. Разработано новое направление по решению крупной проблемы строи­тельно-технологической отрасли, связанное с повышением эффективности тепло­защиты зданий, технологических объектов и технологического оборудования, сни­жением себестоимости строительства и экономией энергоресурсов. В основе пред­лагаемых решений лежит широкое применение повсеместно распространенных природных сырьевых ресурсов, составляющих минеральную основу всех разрабо­танных составов пенокерамобетонов.

Определены рациональные области применения и технико-экономическая эффективность производства разработанных пенокерамобетонов.