

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 693.54; 666.972

**МОРДИЧ**  
**Михаил Михайлович**

**ТЕХНОЛОГИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КЕРАМЗИТОПЕНОБЕТОНА ДЛЯ МОНОЛИТНОГО И СБОРНОГО  
СТРОИТЕЛЬСТВА**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия

Минск, 2019

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель **БАТЯНОВСКИЙ Эдуард Иванович**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технология строительства» Белорусского национального технического университета, г. Минск

Официальные оппоненты: **КУЗЬМЕНКОВ Михаил Иванович**,  
Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Химическая технология вяжущих веществ» Учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

**ТЕРЕХОВА Ирина Анатольевна**,  
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Государственного предприятия «Институт жилища - НИПТИС им. Атаева С.С.», г. Минск

Оппонирующая организация Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС», г. Минск

Защита состоится «29» ноября 2019 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, главный корпус, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 8(017) 293-96-73. E-mail: kovshar-36@tut.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «29» октября 2019 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук

С. Н. Ковшар

© Мордич М. М., 2019

© Белорусский национальный  
технический университет, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач при строительстве и эксплуатации жилищного фонда Республики Беларусь является обеспечение требований к теплоизолирующей функции наружных ограждающих конструкций зданий. Поэтому совершенствование технологии получения энергоэффективных стеновых материалов, которые сочетали бы низкую теплопроводность с достаточными прочностными характеристиками, то есть обеспечивали рациональное сочетание теплоизолирующей и несущей функций, предоставляет собой актуальную задачу.

Приведенным критериям в наибольшей мере соответствуют легкие бетоны поризованной структуры, в частности производимые в нашей стране изделия из автоклавного ячеистого бетона на основе извлекново-кремнеземистого вяжущего с использованием извести-кипелки. Эта технология ориентирована на производство штучных изделий заводского изготовления. С расширением строительства из монолитного бетона появилась потребность в технологии ячеистого бетона, которая могла бы обеспечить условия возведения ограждающих конструкций с требуемым термическим сопротивлением теплопередаче монолитным способом. Традиционная технология ячеистого бетона эти условия не обеспечивает. В этой связи перспективно применение в монолитном строительстве ячеистого бетона, полученного с использованием пенообразователей, то есть пенобетона.

Однако в процессе исследований и практического использования выявились недостатки пенобетона, которые связаны с нестабильностью свойств пенобетонных смесей, что затем проявляется в повышенной осадке (и усадке) и неоднородности структуры и свойств затвердевшего материала, то есть в уровне и постоянстве его физико-технических показателей, определяющих качество конечной продукции. В настоящей диссертационной работе представлено решение данной задачи путем создания агломератного материала – керамзитопенобетона, полученного с применением особо легкого керамзитового заполнителя ( $\rho_0^k \leq 400 \text{ кг/м}^3$ ) и пенобетонного связующего со средней плотностью  $\rho_{\text{ср}} \sim 200 \dots 600 \text{ кг/м}^3$ , что позволило получить материал с однородной (не подверженной осадке) структурой в диапазоне средней плотности  $300 \dots 700 \text{ кг/м}^3$ , обеспечивающий требуемые теплофизические и прочностные характеристики для возводимых стеновых (внутренних и наружных) и иных строительных конструкций.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.**

Работа содержит результаты исследований автора, полученные при выполнении заданий в 2008–2013 гг. по программе ГНТП «Строительные материалы и технологии» по хозяйственному договору № 2673/096 с Государственным предприятием «Институт НИПТИС им. Атаева С. С.» по теме «Провести исследования, разработать составы монолитного керамзитопенобетона и технологию его применения при возведении ограждающих конструкций зданий с использованием несъемной опалубки из плоских цементно-керамзитовых листов, армированных стеклотекстурой», в рамках общего договора с Минстройархитектуры РБ № 2-БФН/08 от 20.03.2008 «Провести исследования, разработать и внедрить комплекс облегченных многослойных наружных ограждающих конструкций с повышенным сопро-

тивлением теплопередаче, обеспечивающих возможность быстрого возведения энергоэффективных зданий и надстроек различной этажности и назначения на основе создания и производственного освоения новых облицовочных материалов и тонкостенных металлических профилей».

**Цель и задачи исследования.** Цель исследования – получить эффективный конструкционно-теплоизоляционный материал – керамзитопенобетон, не подверженный осадке, обладающий пониженной средней плотностью, и разработать технологию его применения при возведении (устройстве) конструкций в построечных условиях и изготовлении сборных изделий.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать методику расчета и составы пенобетона и керамзитопенобетона, обеспечивающие требуемые условия формирования и свойства керамзитопенобетона;

- исследовать влияние компонентов связующего – пенобетона, на свойства пенобетонной смеси и затвердевшего материала, а также условия (режимы) твердения, обеспечивающие ему требуемую среднюю плотность и прочность;

- исследовать взаимозависимость свойств керамзитопенобетонной смеси от свойств и объемного содержания в ней керамзитового гравия и пенобетонной составляющей, определить их оптимальные соотношения и влияние на реологические свойства керамзитопенобетонных смесей, среднюю плотность и прочность затвердевшего керамзитопенобетона;

- разработать технологические параметры режимов приготовления пенобетонной и керамзитопенобетонной смеси, приемов их транспортирования с целью обеспечения однородности материала, а также режимы твердения керамзитопенобетона, обеспечивающие требуемый темп роста его прочности и уровень свойств;

- исследовать физико-технические и эксплуатационные свойства керамзитопенобетона, полученного по разработанной технологии, с целью определения рациональной области его применения;

- разработать технологию возведения (устройства) вертикальных и горизонтальных монолитных конструкций и мелкоштучных сборных изделий с использованием керамзитопенобетона, обеспечивающую однородность структуры и требуемый уровень его свойств; подготовить нормативно-техническую документацию, внедрить результаты исследований в строительное производство.

Таким образом, *объектом исследований* являлся керамзитопенобетон для монолитного и сборного строительства.

*Предмет исследований* – технология и свойства керамзитопенобетона.

*Гипотезой*, получившей подтверждение в исследованиях, являлось предположение о том, что при оптимальном соотношении крупного пористого заполнителя – керамзитового гравия и поризованного связующего – пенобетона при интенсификации твердения и формирования структуры цементного камня полифункциональным комплексом химических добавок будет получен безосадочный и безусадочный материал, характеризующийся однородностью физико-механических свойств при сниженной средней плотности и теплопроводности.

**Научная новизна** результатов диссертационных исследований заключается в развитии теоретических представлений и эмпирических положений о формировании структуры и свойств конгломератного конструкционно-теплоизоляционного материала – керамзитопенобетона, в их зависимости от свойств и соотношения

компонентов: облегченного керамзитового гравия (заполнителя) и связующего – поризованной пенобетонной смеси, при ее переходе в твердофазное состояние.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методики расчета и составы пенобетона марок по средней плотности D200...D600, а также керамзитопенобетона в диапазоне марок D300...D700, обеспечивающие стабильность формовочных свойств пенобетонной и керамзитопенобетонной смеси и свойств затвердевшего связующего (пенобетона) и разрабатываемого материала – керамзитопенобетона;

- экспериментальное обоснование эффективности в пенобетоне комплекса неорганических добавок  $CaCl_2$  и  $Al_2(SO_4)_3$  и их оптимальной дозировки, составляющей 1 %  $CaCl_2$  + 1 %  $Al_2(SO_4)_3$  от массы цемента, которая обеспечивает ускорение роста пластической прочности и схватывания пенобетонной смеси, исключает осадочные явления и минимизирует усадку в процессе твердения пенобетона во всем диапазоне марок по средней плотности (D200...D600), а в итоге способствует повышению темпа роста и уровня прочности пенобетона указанных марок до 150 %...180 % (то есть в 1,5...1,8 раза) и обеспечивает однородность свойств пенобетона при укладке его в конструкции (изделия) слоями высотой до 1000 мм;

- экспериментальное обоснование эффективности введения в связующее – пенобетон, отечественного углеродного наноматериала (УНМ), обеспечившего рост его прочности до 50 % к 7 суткам твердения и до 30 % в проектном 28-суточном возрасте при использовании его рациональной разновидности («УНМ-ПХР»), выявленной среди других, представленных разработчиками), а также оптимальной дозировки этого вида УНМ, равной  $(0,025 \pm 0,005)$  % от массы цемента, и способа его введения в пенобетонную смесь в виде дисперсии, приготовленной на 1 %-ном растворе добавки суперпластификатора;

- технология приготовления пено- и керамзитопенобетона и закономерности влияния соотношения между керамзитовым гравием и пенобетонным связующим в керамзитопенобетоне на технологические свойства его смеси и однородность свойств затвердевшего материала марок по средней плотности D300...D700, позволившие обосновать рациональное объемное  $(0,7...0,8 \text{ м}^3)$  содержание керамзита с учетом его собственных физико-технических свойств и в зависимости от требуемой средней плотности и прочности получаемого керамзитопенобетона;

- экспериментально установленные физико-технические характеристики керамзитопенобетона в диапазоне марок по плотности D300...D700: прочность (на сжатие (кубиковая, призмная) и при изгибе), модуль упругости, водопоглощение, сорбционная влажность и влаготдача, теплопроводность и сопротивление теплопередаче, паропроницаемость, – уровень которых превышает аналогичные характеристики известных аналогов и обеспечивает эффективность его применения в строительном производстве при возведении (устройстве) монолитных стеновых и иных конструкций и изготовлении сборных (штучных) изделий;

- результаты производственного внедрения диссертационного исследования, отраженные в промышленном изготовлении в условиях строительной площадки самонесущих внутренних стен и элементов кровель из керамзитопенобетона в общем объеме ~ 3020 м<sup>3</sup>. С учетом снижения материало- и трудоемкости возведения (устройства) конструкций зданий общий экономический эффект от внедрения разработки в указанном объеме составил ~ 33 915 долларов США (по курсу на декабрь 2018 г.).

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Диссертационная работа представляет собой самостоятельный труд соискателя. Соавторы публикаций, приведенных далее в списке, оказывали техническую помощь при подготовке и проведении экспериментальной части исследований. Обработку их результатов автор проводил самостоятельно.

Первоначально работа шла под научным руководством к. т. н., доцента Г. С. Галузо. В связи с изменением направления исследований, болезнью и уходом на пенсию Г. С. Галузо работа продолжена и завершена под руководством д. т. н., профессора Э. И. Батяновского.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертации представлены на следующих научных конференциях: II Международный симпозиум “Проблемы современного бетона и железобетона” (г. Минск, 21–23 октября 2009 г.); III Международный симпозиум “Проблемы современного бетона и железобетона” (г. Минск, 9–11 ноября 2011 г.); Международный семинар “Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства” (г. Минск, 22–23 мая 2013 г.); Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: XX Международный научно-методический семинар (г. Гродно, 17–19 февраля 2016 г.); Международная научно-техническая конференция “Проблемы современного строительства” (Минск, 30 мая 2018 г.); Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов (БНТУ, Минск, 2010–2018 гг.).

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 11 публикациях, в том числе в 4 статьях в изданиях по перечню ВАК, в 6 статьях и материалах докладов научно-технических конференций и в 1 патенте. Общий объем публикаций составляет 4 авторских листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Ее полный объем составляет 200 страниц, включая: 19 рисунков на 9 страницах, 42 таблицы на 17 страницах, 3 приложения на 67 страницах и библиографический список из 112 наименований на 9 страницах, из которых 11 – авторские работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** диссертации на основе анализа работ Ю. М. Баженова, А. А. Брюшкова, Г. А. Бужевича, Б. В. Дерягина, С. М. Ицковича, Д. П. Киселева, Б. С. Комиссаренко, Г. В. Кривицкого, А. П. Меркина, Л. В. Моргун, Н. А. Попова, Г. П. Сахорова, М. З. Симонова, Б. Г. Скрамтаева, В. Н. Тихомирова, В. Х. Черных, Ю. Д. Чистова, Ю. Л. Ямова и других исследователей сделаны следующие выводы.

Как в научных исследованиях, так и в работах, отражающих производственное получение и использование ячеистого бетона, основное внимание уделено технологии изготовления сборных (штучных) изделий из газобетона на известково-кремнеземистом вяжущем. Технология получения и использования пенобетона на цементном вяжущем даже для заводского производства изделий отражена эпизодически, применительно к конкретным условиям, сопутствовавшим их изготовлению.

Исследования, направленные на применение пенобетона (а еще в большей степени – керамзитопенобетона) в монолитном строительстве, в частности применительно к возведению стеновых конструкций, единичны. Их результаты не соответствуют современному уровню требований по физико-техническим характеристикам, включая как несущую, так и (в особой мере) теплозащитную функцию.

Вместе с тем накопленный опыт применения пенобетона в строительстве (включая опыт автора при получении полистиролфибропенобетона), а также наличие в Беларуси производства керамзитового гравия с насыпной плотностью менее  $400 \text{ кг/м}^3$ , создают условия для реализации идеи эффективного совмещения в конгломератном материале – керамзитопенобетоне, особо легкого крупного заполнителя и высокопоризованного связующего, в качестве которого используется пенобетон. По результатам анализа были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, приведенные в общей характеристике работы.

**Во второй главе** приведены характеристики исходных материалов, методики проведения стандартизированных испытаний и вариативные (авторские) методики исследований, а также методика примененного электронно-микроскопического анализа с целью оценки состояния структурного строения затвердевшего связующего – пенобетона.

Приведены методики приготовления пенобетонной и керамзитопенобетонной смеси с использованием предложенного автором пеногенератора, позволяющего получать пены как низкократные, так и высокократные, а также пенобетонную смесь требуемых качественных характеристик. На этой основе затем была отработана технология приготовления керамзитопенобетонной смеси расчетной средней плотности, разработаны, апробированы и приведены в тексте диссертации методика и особенности технологии ее подачи (транспортирования) и укладки, а также параметры рациональных режимов твердения и последующего ухода за керамзитопенобетоном.

С целью обеспечения высокой степени достоверности результатов экспериментов использованы общепризнанные методики оценки разброса их значений по коэффициентам вариации основных показателей (средней плотности, прочности и др.).

**Третья глава** отражает исследования технологии приготовления поризованного связующего компонента – пенобетона, со свойствами, необходимыми для получения на его основе керамзитопенобетона в диапазоне марок по средней плотности D300...D800. Учитывая, что плотность керамзитопенобетона зависит от средних плотностей обоих компонентов, а получение керамзита с насыпной плотностью менее  $400 \text{ кг/м}^3$  (и тем более, менее  $300 \text{ кг/м}^3$ ) проблематично, на первом этапе отработали технологию получения пенобетона в диапазоне марок D200...D600 (таблица 1).

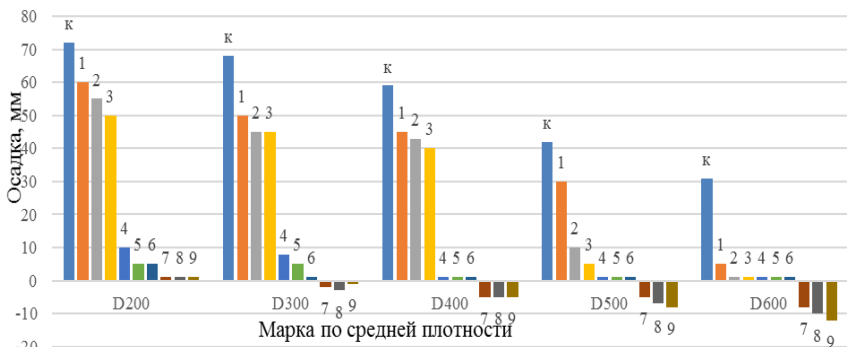
В процессе исследований был определен наиболее рациональный (среди получивших предварительную оценку разновидностей пенообразователей) вид и оптимальное количество пенообразователя «Laston», составившее для пенобетона разных марок по плотности  $\sim 0,5 \text{ \%} \dots 1,3 \text{ \%}$  от массы цемента (МЦ), который использовали в последующих экспериментах, обеспечивая получение пенобетона марок D200...D600.

Таблица 1. – Физико-механические свойства пенобетона плотностью D200...D600 на синтетическом «ПБ 2000» и протеиновом «Laston» пенообразователях

Расчетная плотность	Плотность фактическая в сухом состоянии (образцы 100x100x100 мм, выпиленные из 1000 мм призмы)			Среднее значение плотности	$v, \rho_n$	Предел прочности на сжатие в сухом состоянии, МПа (образцы 100x100x100 мм, выпиленные из 1000 мм призмы)			Среднее значение прочности	$v, R_n$
	Нижний	Средний	Верхний			Нижний	Средний	Верхний		
D200	Полностью осел			-	-	-	-	-	-	-
D200*	220	210	195	208	0,06	0,16	0,15	0,12	0,14	0,14
D300	Осадка в форме h = 1000 мм составила 46 % или 460 мм									
D300*	310	300	298	303	0,02	0,33	0,32	0,29	0,32	0,07
D400	460	420	390	423	0,08	0,59	0,52	0,49	0,53	0,1
D400*	420	410	400	410	0,02	0,75	0,73	0,70	0,73	0,03
D500	550	530	496	525	0,05	1,15	0,95	0,81	0,97	0,17
D500*	515	502	498	505	0,02	1,36	1,32	1,28	1,32	0,03
D600	664	630	590	628	0,06	1,36	1,30	1,26	1,31	0,04
D600*	610	604	592	602	0,01	1,64	1,62	1,60	1,62	0,01

\* - Применялся пенообразователь «Laston»; в остальных случаях – «ПБ 2000»

С целью снижения отрицательного эффекта «осадки-усадки» и повышения прочности затвердевшего пенобетона в состав вводили химические добавки различного функционального назначения. В результате экспериментально подобран комплекс из оценивавшихся добавок ускорителей твердения  $CaCl_2$  и  $Na_2SO_4$  и уплотняющей структуру цементного камня добавки  $Al_2(SO_4)_3$  (рисунки 1 и 2).



1 – 1,0 %  $Na_2SO_4$ ; 2 – 2,0 %  $Na_2SO_4$ ; 3 – 3,0 %  $Na_2SO_4$ ; 4 – 1,0 %  $CaCl_2$ ; 5 – 2,0 %  $CaCl_2$ ; 6 – 3,0 %  $CaCl_2$ ; 7 – 1,0 %  $Al_2(SO_4)_3$ ; 8 – 2,0 %  $Al_2(SO_4)_3$ ; 9 – 3,0 %  $Al_2(SO_4)_3$ ; к – контрольный состав без добавок

Рисунок 1. – Зависимость величины осадки пенобетона от вида и расхода добавки ускорителя твердения в % от массы цемента (МЦ) для различных марок по средней плотности (D)

Влияние вида и количества вводимой в смесь добавки на свойства пенобетонной смеси и затвердевшего пенобетона оценивали по двум показателям:



- устойчивости к осадке «массива» из укладываемой за один прием в форму высотой 1000 мм (сечением 100 x 100 мм) пенобетонной смеси при твердении в течении 24 часов (рисунок 1);
- изменения прочности пенобетона на сжатие в возрасте 3, 7 и 28 суток (рисунок 2).

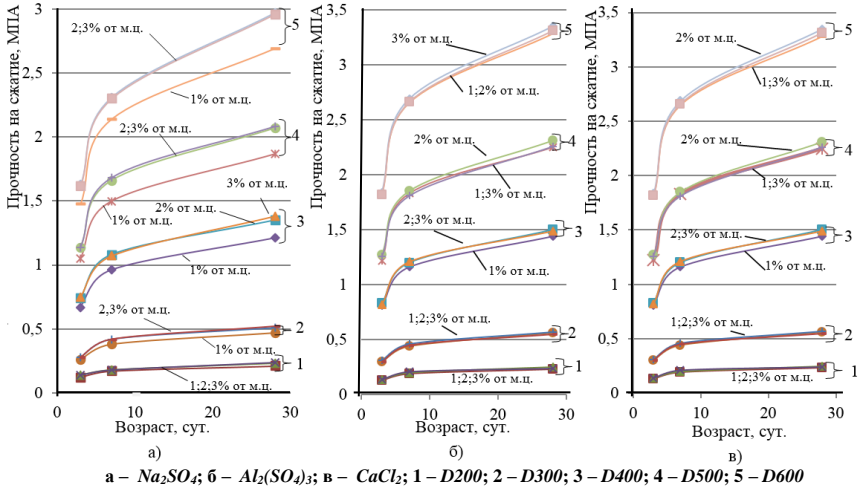


Рисунок 2. – Зависимость изменения прочности пенобетона на сжатие в возрасте 3, 7 и 28 суток от вида добавки и средней плотности пенобетона

Прочность определяли на образцах (по 6 штук в серии) размерами 100 x 100 x 100 мм, отобранных из средней части по высоте исходного «массива» пенобетона марок D200...D600, хранившихся до испытаний в камере нормально-влажностного твердения. Из результатов экспериментов следует, что развитие реакций вещества  $Al_2(SO_4)_3$  с гипсовой составляющей цемента в водной среде с образованием крупных кристаллогидратов этtringита (при сопутствующем увеличении объема) способствует стабилизации структуры твердеющего цементного камня. Этот вывод подтверждается выявленным ростом высоты образцов (с открытой верхней грани) пенобетона (гистограммы 7, 8, 9 на рисунке 1).

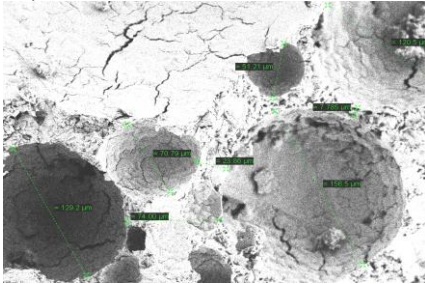
Одновременно установлено повышение температуры твердеющего пенобетона с добавками в сравнении с составом без них, которое составило для  $Na_2SO_4$  ~ 2 °С...3 °С, для добавки  $CaCl_2$  ~ 4 °С...5 °С и для  $Al_2(SO_4)_3$  ~ 7 °С, отражая нарастающую активизацию процесса гидратации цемента в их присутствии. Изменение прочности образцов (серии по 6 штук) затвердевшего пенобетона с добавками (рисунок 2) свидетельствует о примерно равной эффективности применения добавок  $Al_2(SO_4)_3$  и  $CaCl_2$ , и меньшей – для  $Na_2SO_4$ .

Наиболее эффективным в пенобетоне оказался комплекс из добавок  $CaCl_2$  и  $Al_2(SO_4)_3$  в их оптимальной дозировке, составляющей 1 %  $CaCl_2$  + 1 %  $Al_2(SO_4)_3$  от массы цемента, который обеспечил ускорение роста пластической прочности и схватывания пенобетонной смеси для всего диапазона марок пенобетона по средней плотности (D200...D600), а также способствовал повышению темпа роста

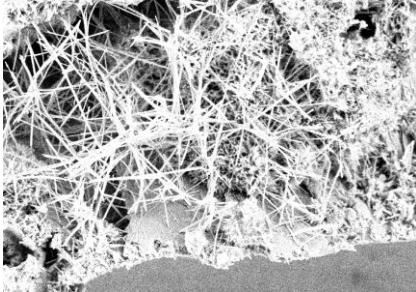
и уровня прочности пенобетона указанных марок до 150 %...180 % (то есть в 1,5...1,8 раза). Одновременно это сочетание добавок исключает осадку пенобетонной смеси, характерную для пенобетона без них в начальные сроки (1 сутки) твердения, а в более поздние сроки – ограничивает усадочные явления, включая влажностную усадку при высушивании пенобетона. Экспериментально установлено, что в наибольшей мере эффективно их сочетание с добавкой метилцеллюлозы, в частности «Гидроксипропилметилцеллюлозы УСК-200 ТТ», в дозировке 0,5 % от массы цемента, что практически исключило усадку при высушивании пенобетона.

Кроме приведенного, экспериментально выявлена эффективность (рисунок 3) введения в пенобетон углеродного наноматериала (УНМ) белорусского производства, обеспечившего рост прочности пенобетона до 50 % к 7 суткам твердения и до 30 % в проектном 28-суточном возрасте.

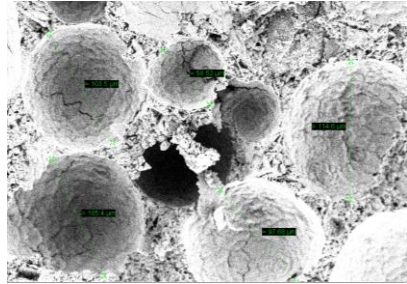
а.1)



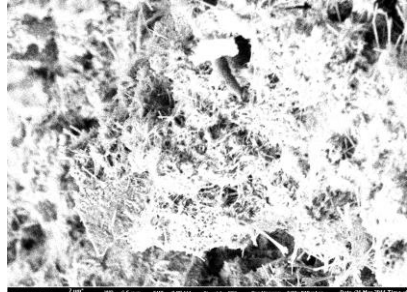
а.2)



б.1)



б.2)



а.1 – контрольный пенобетон при увеличении 20 мкм в 1 см; а. 2 – контрольный пенобетон при увеличении 2 мкм в 1 см; б. 1 – пенобетон с УНМ при увеличении 20 мкм в 1 см; б. 2 – пенобетон с УНМ при увеличении 2 мкм в 1 см

Рисунок 3. – Микроструктуры пенобетона на микроскопе SUPRA 55-30-44

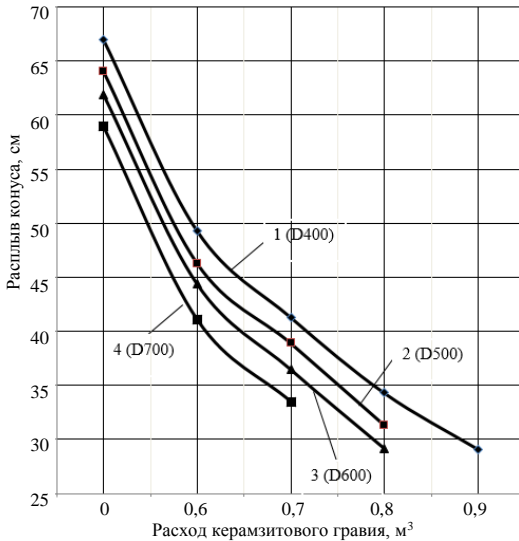
Выявлена рациональная его разновидность («УНМ-ПХР») среди других, представленных разработчиком (ООО «Инновационные технологии», г. Минск), а также установлена оптимальная дозировка этого вида УНМ, равная  $(0,025 \pm 0,005)$  % от массы цемента, и способ его введения в пенобетонную смесь в виде водной дисперсии, приготовленной на 1 %-ном растворе пластифицирующей добавки первой группы. Молекулы последней создают у поверхности частиц УНМ «экранирующую» оболочку, обеспечивая сохранение свойств пены, так как частицы УНМ без

пластификатора способны снижать ее устойчивость («прорезать» пену). Результаты электронной микроскопии (рисунок 3) свидетельствуют, что введение УНМ в пенобетон в оптимальной дозировке обеспечило формирование более упорядоченной микроструктуры цементного камня в стенках пор, а также макроструктуры пенобетона в целом, что и является основой роста его прочности.

Экспериментально выявленные особенности технологии получения пенобетона с заданными свойствами создали необходимые предпосылки для разработки технологии керамзитопенобетона.

**В четвертой главе** отражены исследования и их результаты, полученные при разработке технологии конструкционно-теплоизоляционного керамзитопенобетона в диапазоне средних плотностей марок D300...D700. На начальном этапе выявили зависимость формовочных свойств керамзитопенобетонных смесей (в диапазоне указанной средней плотности) от объемного содержания (расхода) керамзитового гравия (рисунок 4).

В процессе экспериментов установлено, что метод определения формуемости керамзитопенобетонной смеси по осадке стандартного конуса не пригоден для оценки этого показателя, так как полученные данным методом результаты были несопоставимы. Одновременно установили приемлемость использования оценки по распылу конуса, обеспечившей сопоставимость результатов независимо от консистенции керамзитопенобетонной смеси и изменения объемного содержания в нем керамзитового гравия (рисунок 4). Из результатов экспериментов очевидна тенденция к снижению формуемости керамзитопенобетонной смеси с увеличением



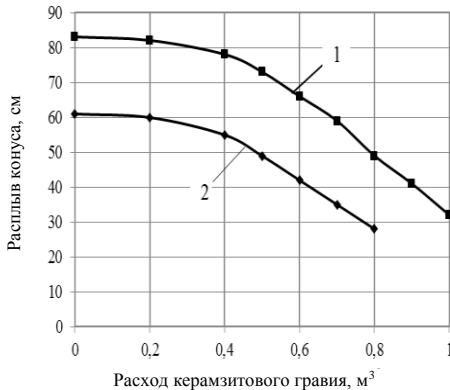
**Рисунок 4.** – Зависимость подвижности (пластичности) керамзитопенобетонной смеси от расхода керамзитового гравия

дозировки крупного керамзитового заполнителя (особенно если его расход превышал  $0,8 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  керамзитопенобетона), что предопределило необходимость использования пластифицирующих добавок.

На рисунке 5 в графической интерпретации приведены экспериментальные данные, отражающие влияние на формуемость керамзитопенобетонной смеси пластифицирующих добавок 1-й группы – суперпластификатора «С-3», и добавки с повышенным водоредуцирующим эффектом – «гиперпластификатора», с маркировкой «Стахемент 2000», на примере смеси керамзитопенобетона со средней плотностью марки D600.

Выявлена тенденция роста эффективности пластификатора в смеси с повышением содержания в ней керамзита. На наш взгляд, это связано с адсорбцией молекул поверхностно активных веществ (ПАВ) на поверхности зерен заполнителя и снижением сил взаимодействия между его поверхностью и вязко-пластичной массой пенобетонной смеси в зонах их контакта.

В результате установлено, что приемлемый для формирования керамзитопенобетонной смеси уровень расплыва конуса ( $\geq 30$  см) может быть обеспечен при «предельном» объемном содержании в ней до  $1 \text{ м}^3$  керамзитового гравия (график 1 рисунка 5).



1 – 0,5 % «Стахемент-2000» от МЦ;  
2 – 2,0 % «С-3» от МЦ

**Рисунок 5.** – Зависимость формуемости (пластичности) керамзитопенобетонной смеси от расхода керамзитового гравия и вида примененной добавки

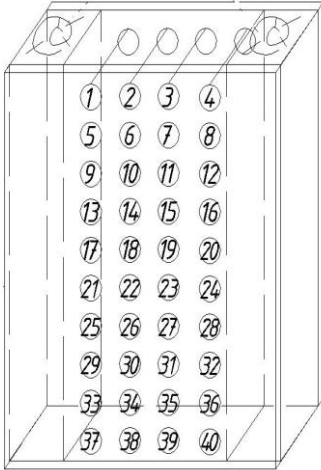
Одной из задач при разработке технологии получения и практического применения керамзитопенобетона однородной структуры и свойств являлось определение допустимой высоты слоя смеси, одновременно укладываемой в опалубку (форму). Оценку однородности структуры керамзитопенобетона осуществляли по данным о скорости прохождения ультразвукового импульса (далее – скорости ультразвука) (ГОСТ 17624-2012), а также по величинам его средней плотности и прочности (ГОСТ 12730.1-78 и ГОСТ 10180-2012), определенным для разных участков высоты образцов, отформованных за один прием и имитирующих фрагмент стены, размерами в плане  $90 \times 400$  мм, при высоте 800 мм

(рисунка 6). Для оценки принят состав керамзитопенобетона (рассчитанный по разработанной в диссертации методике) марки D500 (содержащий  $0,8 \text{ м}^3$  заполнителя) как примерно «средний» из диапазона марок D300...D700.

Экспериментально установлена стабильность свойств керамзитопенобетона по скорости прохождения ультразвука (в 40 точках) и по значениям средней плотности и прочности (на сжатие) при испытаниях образцов-цилиндров ( $\text{Ø} 60$  мм; высотой 90 мм; в серии 6 шт.), отобранных из образцов-блоков после проведения испытаний ультразвуком (таблица 2).

Полученные данные подтвердили высокую степень однородности структурного строения оцениваемого керамзитопенобетона, его плотности и прочности, а также отсутствие осадки слоя керамзитопенобетона высотой 800 мм в процессе твердения как в начальные сроки, так и в проектном возрасте.

а)



б)



Рисунок 6. – Схема расположения мест оценки скорости ультразвука (а) и выбуривания образцов (б) для оценки плотности и прочности

Для пенобетона такой результат был обеспечен использованием комплекса химических добавок 1 %  $Al_2(SO_4)_3$  + 1 %  $CaCl_2$  (рисунки 1 и 2), которых в рассматриваемом случае в пенобетонной составляющей не было.

Таблица 2. – Результаты испытаний керамзитопенобетона марки D500 на однородность

№ ряда при отборе образцов по высоте	Средние значения			Величина коэффициентов вариации, отражающая однородность керамзитопенобетона, доли ед. (%)				
	$V_{ср}$ , м/с	$\rho_{ср}$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	по скорости ультразвука			по средней плотности	по прочности
				по горизонтали	по вертикали	Среднее значение		
1(верх)	2261,67	498	2,61	0,0316 (3,16)	0,0313 (3,13)	0,0314 (3,14)	0,0119 (1,2)	0,0415 (4,15)
2	2365,5	502	2,62					
3	2439,25	503	2,69					
4	2489,25	504	2,61					
5	2491,08	508	2,62					
6	2475,75	511	2,68					
7	2457,67	512	2,65					
8 (низ)	2411,75	516	2,65					

Очевидно проявление структурирующей роли «каркаса» из зерен керамзита в керамзитопенобетоне, а также то, что снижению осадки в начальный период и усадки при последующем твердении керамзитопенобетона способствовало снижение водотвердого (водоцементного) отношения за счет водоредуцирующего эффекта примененного пластификатора, составившего для 0,5 % «Стахемент 2000» – ДВ/Т ~ 30 %. Как следствие, в итоге практически отсутствовала осадка данного образца и других, формуемых для последующих экспериментов.

Одновременно решали одну из задач исследований, заключающуюся в определении оптимального содержания

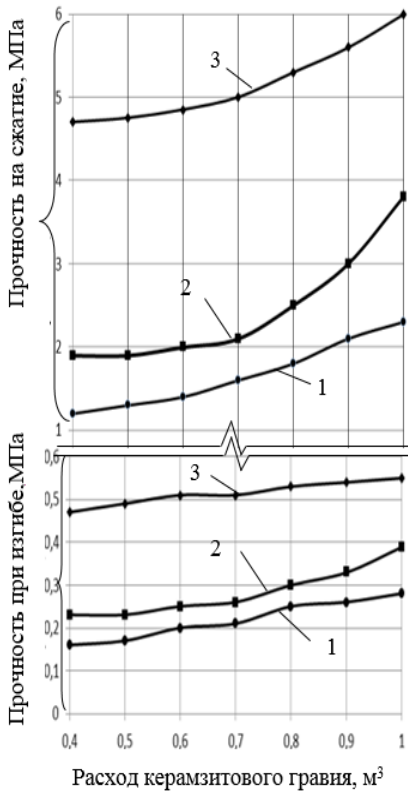


Рисунок 7. – Тенденция изменения прочности керамзитопенобетона

не более D500, и прочностью не менее 2,0 МПа. При этом прочностью на сжатие керамзитопенобетона возрастает с увеличением дозировки гравия вплоть до 1,0 м³ керамзитопенобетона (графики 1 и 2 рисунка 7). С ростом средней плотности (марка D600 и выше) необходимо использовать более прочный заполнитель (при сдавливании в цилиндре не менее 2,5 МПа), а в качестве связующего – пенобетон соответствующей марки по средней плотности либо даже меньшей плотности (но не

расхода) крупного заполнителя в керамзитопенобетоне с позиций влияния на его свойства. Результаты испытаний на прочность приведены в виде графических зависимостей рисунка 7 в зависимости от расхода керамзитового гравия. Образцы марок D400 (график 1), D500 (график 2) приготовлены на керамзитовом гравии фракции 4...10 мм,  $\rho_{\text{кг}} \sim 370 \text{ кг/м}^3$ , прочность при сдавливании в цилиндре ~ 1,9 МПа (производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль»), а марки D600 (график 3) – на керамзитовом гравии фракции 4...10 мм,  $\rho_{\text{кг}} \sim 530 \text{ кг/м}^3$ , прочность при сдавливании в цилиндре ~ 2,5 МПа (производства – Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК»). При этом экспериментально выявлена неоднозначная зависимость средней плотности и прочности керамзитопенобетона от соотношения плотности и прочности связующего (пенобетона) и керамзитового гравия. Установлено, что для получения керамзитопенобетона марок  $\leq D500$  на особо легком керамзите ( $\rho_{\text{кг}} \sim 370 \text{ кг/м}^3$ , прочность ~ 1,9 МПа) следует использовать пенобетон соответствующей средней плотности, но

менее D350, при прочности не менее 1,2 МПа). Эти положения были учтены при разработке методики расчета составов керамзитопенобетона в диапазоне марок D300...D700. По совокупности приведенных экспериментальных данных был сделан вывод, что оптимальное объемное содержание крупного заполнителя в керамзитопенобетоне соответствует  $\sim 0,7...0,8 \text{ м}^3$  на  $1,0 \text{ м}^3$  бетона, и последующие исследования были выполнены на составах с учетом этого фактора.

Разработанный керамзитопенобетон – конструкционно-теплоизоляционный материал, для применения которого необходимы расчетные физико-механические характеристики, в частности модуль упругости. На рисунке 8 приведена экспериментально установленная зависимость изменения модуля упругости керамзитопенобетона в диапазоне марок D400...D700. Для сравнения приведены его величины для равной средней плотности газосиликатного бетона по данным М. З. Симонова и С. М. Ицковича и для пенобетона – И. Х. Наназшвили и В. С. Дорофеева.

Очевидно, что по упругим свойствам керамзитопенобетон не только не уступает, но и несколько превосходит газосиликатный бетон автоклавного твердения (график 2) и, тем более, пенобетон (график 3).

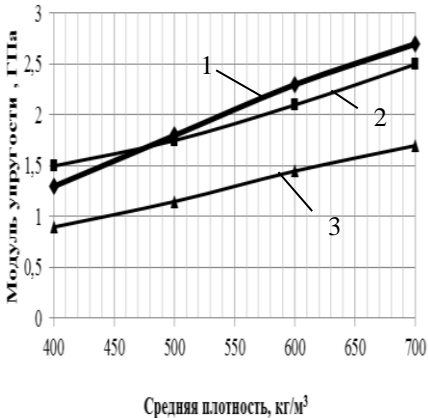


Рисунок 8. – Значения модуля упругости керамзитопенобетона во взаимосвязи с его средней плотностью (график 1); тоже для газосиликатного бетона (график 2); и пенобетона (график 3)

Далее в 4-й главе приведены результаты определения основных эксплуатационных свойств керамзитопенобетона: водопоглощения, влагоотдачи, сорбционной влажности, паропроницаемости, теплопроводности и термического сопротивления, подтверждающие возможность и эффективность его использования в наружных ограждающих конструкциях (таблица 3).

При проектировании и устройстве наружных ограждающих конструкций из керамзитопенобетона следует обеспечивать требуемую величину термического сопротивления. На территории Республики Беларусь оно, согласно ТКП 45-2.04-43-2006, должно быть не менее  $R_m \sim 3,2 \text{ м}^2\text{С/Вт}$ , с перспективой дальнейшего повышения. В расчетах исходили из предположения, что керамзитопенобетон будет использоваться в варианте устройства однослойной ограждающей конструкции, так как это наиболее экономически целесообразно. В этой связи при оценке обеспечиваемого термического сопротивления стен (или иных конструкций) разной толщины, возведенных (устроенных) из керамзитопенобетона разных марок по плотности, в расчет принимали только слой керамзитопенобетона (таблица 4).

Таблица 3. – Физико-механические и эксплуатационные свойства керамзитопенобетона

Наименование показателя	Свойства керамзитопенобетона в зависимости от средней плотности (при расходе керамзитового гравия ~ 0,8 м <sup>3</sup> )			
	D 400	D 500	D 600	D700
1 Прочность на сжатие (кубиковая), МПа	1,8	2,5	5,3	5,9
2 Прочность на растяжение при изгибе, МПа	0,25	0,3	0,53	0,61
3 Призменная прочность, МПа	1,3	2,3	3,4	4,3
4 Модуль упругости, ГПа	1,3	1,8	2,3	2,7
5 Водопоглощение (по массе), %	47,3	31,9	23,3	20,2
6 Сорбционная влажность, %:				
- при $\varphi_{\text{воздуха}} \sim 40\%$ ;	-	0,89	-	-
- при $\varphi_{\text{воздуха}} \sim 60\%$ ;	-	1,12	-	-
- при $\varphi_{\text{воздуха}} \sim 100\%$	-	5,32	-	-
7 Влагоотдача, % (до стабилизации)	21,8	14,1	11,1	10,3
8 Паропроницаемость, мг/м·ч·Па	0,260	0,241	0,231	0,219
9 Теплопроводность*, Вт/(м·°C)	0,099	0,121	0,137	0,177

\* – Для марки D300 –  $\lambda \sim 0,09$  Вт/(м·°C)

Таблица 4. – Расчетный коэффициент термического сопротивления строительных конструкций при устройстве их из керамзитопенобетона

Коэффициент термического сопротивления, м <sup>2</sup> ·C/Вт	Толщина слоя, м, керамзитопенобетона, обеспечивающая данное термическое сопротивление в зависимости от его средней плотности				
	D300	D 400	D500	D 600	D700
3,2	0,288	0,317	0,387	0,438	0,566
4,0	0,360	0,396	0,484	0,548	0,708
5,0	0,450	0,495	0,605	0,685	0,885

Согласно данным таблицы 4 требуемое термическое сопротивление ( $R_m \geq 3,2$  м<sup>2</sup>·C/Вт) обеспечивается одним слоем керамзитопенобетона толщиной от ~ 290 до ~ 570 мм в диапазоне марок от D300 до D700 соответственно, что меньше (за счет меньшей теплопроводности), чем для пенобетона и газобетона равных марок по средней плотности. При этом керамзитопенобетон обеспечивает (как это установлено настоящими исследованиями) возможность возведения монолитных стеновых конструкций в опалубке с высокой степенью однородности свойств по высоте конструкций и темпом ведения бетонных работ.

**Материал пятой главы** включает данные о производственной апробации результатов диссертационного исследования, а также основные положения технологии возведения (устройства) конструкций в условиях строительного объекта и сборных изделий и оценку экономического эффекта от применения керамзитопенобетона.



Производственную реализацию разработанной технологии в варианте возведения внутренних стеновых конструкций толщиной 50...200 мм и высотой до 3,0 м выполнили на объекте «Жилой дом № 18 по ул. Куриленко (по ген. плану) в г. Смоленск (РФ)». Применена трехстадийная технология (цементное тесто → пенобетонная смесь → керамзитопенобетонная смесь) с использованием смесительного оборудования холдинга «СОВБИ» (РФ) при объеме смесителя ~ 1,0 м<sup>3</sup>. Приготовление керамзитопенобетонной смеси осуществляли на «промежуточном» этаже, с подачей ее на этажи выше и ниже по гибким шлангам - бетоноводу. Укладку керамзитопенобетона в несъемную опалубку (конструкция из гнутых металлических профилей) производили за два приема по высоте слоями до 1,5 м. Проверка степени однородности керамзитопенобетона (марка D400) в конструкции перегородок по высоте показала, что коэффициент вариации плотности не превышал  $v_k \sim 6,2 \%$ , то есть практически соответствовал полученному в диссертации в лабораторных условиях ( $v_k \sim 5,5 \% \dots 6,0 \%$ ).

Апробацию технологии при устройстве плоских конструкций (кровли) осуществили на объекте «Многokвартирные жилые дома со встроенно-пристроенными помещениями общественного назначения и подземной гараж-стоянкой на 100 машиномест в границах улиц Червякова – Каховской – Сморговского тракта. Подземная гараж-стоянка» в г. Минске. В этом случае предварительно приготовленная на растворобетонном узле керамзитобетонная смесь поступала на объект, после чего в нее вводили пену (с использованием пеногенератора) при непрерывном перемешивании в автобетоносмесителе при повышенных оборотах; последующая подача и укладка в конструкцию кровли осуществлялась по системе «кран – бадя». Оценка качества (путем отбора образцов-кernов из конструкции) подтвердила однородность свойств керамзитопенобетона, в частности соответствие проектной документации марке по плотности D600 и класса по прочности на сжатие  $\geq B2$ . Реализация разработки на данном объекте снизила вес конструкции кровли на ~ 25,0 %, что, в свою очередь, обеспечило снижение нагрузок на несущие конструкции, а также снижение материалоемкости на ~ 3 % и финансовых затрат на возведение гараж-стоянки на ~ 0,9 %.

Документальное подтверждение внедрения разработки в виде справок и актов о ее производственной апробации приведено в тексте диссертации. Из него следует, что за период 2016–2018 гг. ОДО «Айрон» (РБ) и ЗАО «Смолстром – сервис» (РФ) в общей сложности применено ~ 3020 м<sup>3</sup> керамзитопенобетона. При этом, за счет снижения материало- и трудоемкости выполненных работ общий экономический эффект составил ~ 33 915 долларов США (по курсу на декабрь 2018 г.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации.

1. Разработаны теоретические основы и экспериментальное обоснование трехстадийной технологии получения и применения в строительстве керамзитопенобетона марок по средней плотности D300...D700, обладающего преимуществом по физико-механическим характеристикам и эксплуатационным свойствам перед известными бетонами – аналогами ячеистой структуры [1–11].

2. Установлены режимы двухстадийного приготовления пенобетонного связующего марок по средней плотности D200...D600 с требуемыми свойствами,

обеспечивающими затем заданные качественные характеристики и свойства керамзитопенобетона в диапазоне марок по средней плотности D300...D700, приготовляемого на третьей стадии, путем введения в пенобетонную смесь керамзитового гравия в объеме 0,7...1,0 м<sup>3</sup> при непрерывном смешивании в течение 60...90 секунд [1–10].

3. Выявлен наиболее эффективный вид и оптимальная дозировка (~ 0,5 %...1,3 % от массы цемента (МЦ) в зависимости от марки по средней плотности) белкового пенообразователя «Laston», а также наиболее рациональное сочетание ускорителя твердения  $CaCl_2$  и уплотняющей структуру цементного камня добавки  $Al_2(SO_4)_3$  и их оптимальная дозировка 1 %  $CaCl_2$  + 1 %  $Al_2(SO_4)_3$ , которая обеспечивает исключение осадки пенобетонной смеси, характерной для пенобетона без этих добавок в начальные сроки (1 сутки) твердения, а в более поздние сроки – ограничивает усадочные явления, включая влажностную усадку при его высушивании. Кроме этого, указанный комплекс добавок способствует повышению темпа роста и уровня прочности пенобетона до 150 %...180 % (то есть в 1,5...1,8 раза), а в сочетании с добавкой «Гидроксипропилметилцеллюлоза УСК-200 ТТ» (в дозировке 0,5 % от массы цемента) практически исключает усадку при высушивании как пенобетона, так и керамзитопенобетона [4, 9, 10].

4. Установлена возможность повышения прочности связующего (пенобетона) до 50 % к 7 суткам твердения и до 30 % в проектом 28-суточном возрасте за счет введения в состав углеродного наноматериала («УНМ-ПХР») в оптимальной дозировке (0,025 ± 0,005) % от массы цемента; разработан способ его введения в виде водной дисперсии, предварительно приготовленной на 1,0 %-ном водном растворе добавки пластификатора 1-й группы (суперпластификатора). Выявлено, что адсорбция молекул ПАВ пластификатора на поверхности частиц УНМ обеспечивает его эффективность в пенобетоне; в противном случае частицы УНМ «прорезают» пену и прочность пенобетона снижается [8].

5. Разработана методика расчета и подобраны составы керамзитопенобетона в диапазоне марок по средней плотности D300...D700, исследованы технологические свойства керамзитопенобетонных смесей в зависимости от свойств и соотношения пенобетонного связующего и керамзитового гравия при его дозировке от 0,4 до 1,0 м<sup>3</sup>. Установлено рациональное объемное содержание керамзитового гравия в керамзитопенобетоне, составляющее 0,7...0,8 м<sup>3</sup> на 1,0 м<sup>3</sup> бетона, и физико-механические характеристики этого заполнителя, обеспечивающие планируемые по расчету состава характеристики и свойства керамзитопенобетона [2, 4, 6].

6. Отработана технология подачи и укладки в конструкции (изделия) керамзитопенобетонной смеси, обеспечивающая высокую степень однородности свойств затвердевшего керамзитопенобетона, характеризующуюся значениями коэффициентов вариации основных показателей качества – средней плотности и прочности не более  $v_k \sim 5,5\% \dots 6,0\%$ , установленными в экспериментах при укладке смеси слоем высотой до 1000 мм в опалубку (или форму) за один прием и подтвержденными при производственном использовании разработанной технологии с укладкой смеси слоем до 1500 мм (коэффициент вариации составил  $v_k \sim 6,2\%$ ), что свидетельствует о ее эффективности [2, 4, 6].

7. Выявлено, что полученный по разработанной технологии керамзитопенобетон характеризуется на 5 %...31 % большими значениями прочности и на 8 %...27 % модуля упругости, на 10 %...83 % меньшими величинами водопо-

глотнения и сорбционной влажности, а также обладает более высокой (на  $\leq 31$  %) способностью к влагоотдаче и паропроницаемости (на 17 %...47 %) при меньшей (на 5 %...12 %) теплопроводности в сопоставлении с газосиликатным ячеистым бетоном автоклавного твердения и пенобетоном равных марок по средней плотности [4].

Производственная апробация результатов исследований подтвердила эффективность разработки за счет снижения материало- и трудоемкости возведения (устройства) конструкций зданий. Общий экономический эффект при объеме реализации керамзитопенобетона в 3020,0 м<sup>3</sup> составил ~ 33 915,0 долларов США (по курсу на декабрь 2018 г.).

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Экспериментально-практические результаты диссертационного исследования рекомендуется использовать:

- при возведении монолитных стеновых и устройстве иных строительных конструкций зданий и сооружений из керамзитопенобетона в съемных и несъемных опалубках;
- при производстве строительных изделий и конструкций из керамзитопенобетона в заводских (и полигонных) условиях.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в рецензируемых научных изданиях**

1. Лыгач, И. О. Новые материалы и технологии для строительства зданий из легких энергоэффективных конструкций / И. О. Лыгач; М. М. Мордич // Архитектура и строительство. – 2009. – № 3. – С. 34–37.
2. Галузо, Г. С. Керамзитопенобетон – эффективный стеновой материал для монолитного строительства и его физико-технические свойства / Г. С. Галузо, М. М. Мордич // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. В 2 Т, 2. / РУП «Институт БелНИИС»; под ред. М. Ф. Марковского (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2009. – С. 330–335.
3. Мордич, М. М. Технология и эксплуатационные свойства ячеистого бетона на неавтоклавного твердения с использованием пористых заполнителей / М. М. Мордич [и др.] // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. В 2 Т, 2. / РУП «Институт БелНИИС»; под ред. М. Ф. Марковского (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 388–397.
4. Мордич, М. М. Технология и физико-механические свойства керамзитопенобетона для монолитного и сборного строительства / М. М. Мордич // Наука и техника. – Минск, 2019. – №18(4) – С. 292–302.

### **Статьи в сборниках научных трудов**

5. Мордич, М. М. Исследование технологических свойств пенобетонной матрицы для получения конструктивно-теплоизоляционного материала - керамзитопенобетона / М. М. Мордич // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сб. науч. ст. В 2 Ч.2. / Белорусский национальный технический университет ; под ред. В. Ф. Зверев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, БНТУ, 2013. – С. 104–112.

6. Галузо, Г. С. Пенобетон с пористыми заполнителями для монолитного строительства в несъемной опалубке / Г. С. Галузо, М. М. Мордич, О. Г. Галузо, Д. В. Романов // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров. Сб. науч. ст. XVI Международного научно-методического семинара – (Брест, 2009). В 2 т. Т2. – Брест, 2009. – С. 55–58.

7. Романов, Д. В. Оптимизация режимов тепловлажностной обработки пенобетонов неавтоклавного твердения / Д. В. Романов, М. М. Мордич, О. Г. Галузо // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства. Сборник международных научно-технических статей. В 2 т. Т2. / БНТУ; под ред. В. Ф. Зверев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, БНТУ, 2015. – С. 118–123.

### **Материалы конференций**

8. Батяновский, Э. И. Особенности применения углеродных наноматериалов в конструкционно-теплоизоляционных пенобетонах / Э. И. Батяновский, М. М. Мордич, Г. С. Галузо // Наука – образованию, производству и экономике: материалы IX международной научно-технической конференции (Минск, 2011) – Минск, БНТУ, 2011. – С. 272–273.

9. Мордич, М. М. Влияние ускорителей твердения на физико-механические показатели качества пенобетона для монолитного строительства / Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: материалы XX международного научно-методического семинара (Гродно, 17–19 февр. 2016 г.) / М-во образования Респ. Беларусь, ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: В.Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно – 2016. – С. 147–152.

10. Мордич, М. М. Основы оптимизации структуры и свойств пенобетона / М. М. Мордич, Э. И. Батяновский // Проблемы современного строительства : материалы Международной научно-технической конференции (Минск, 30 мая 2018 г.) / Белорусский национальный технический университет ; под ред. В. Ф. Зверев (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 286-294.

### **Патенты**

11. Сырьевая смесь для изготовления легких пенополистиролбетонных изделий : пат. 14763 Респ. Беларусь : МПК (2006.1) : С 04В 38/08 / О. Г. Галузо, М. М. Мордич [и др.]: заявитель БНТУ. – № а 20090977 ; заявл. 01.07.2009 ; опубл. 28.02.2011 // Афіцыйны бюл. / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці. – 2011. – № 4. – С. 98.

### Тэхналогія і фізіка-механічныя ўласцівасці керамзітапенабетону для маналітнага і зборнага будаўніцтва

**Ключавыя словы:** цэмент, пенаўтваральнік, керамзіт, пенабетон, керамзітапенабетон, тэхналогія, уласцівасць, шчыльнасць, трываласць, цеплаправоднасць.

**Мэта працы:** атрымаць эфектыўны цеплаізаляцыйна-канструкцыйны матэрыял – керамзітапенабетон, не схільны да ўсадкі і асядання, які валодае паніжанай сярэдняй шчыльнасцю, і распрацаваць тэхнологію яго выкарыстання пры ўзвядзенні канструкцый у будаўнічых умовах і вытворчасці зборных вырабаў.

У выніку тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў атрыманы эфектыўны, не схільны да ўсадкі і асядання цеплаізаляцыйна-канструкцыйны матэрыял – керамзітапенабетон у дыяпазоне асноўных ужываемых у будаўніцтве марак з сярэдняй шчыльнасцю D300...D700, які характарызуецца на 5 %...31 % большай трываласцю і на 8 %...27 % модулем пругкасці, а таксама больш высокім ( $\leq 31$  %) узроўнем парапранікальнасці і вільгацеаддачы (на 17 %...47 %) пры меншай (на 10 %...83 %) велічыні водапаглынання, а таксама сарбцыйнай вільготнасці і цеплаправоднасці ў параўнанні з ячэйстым бетонам аўтаклаўнага цвярдзення і пенабетонам аднолькавай шчыльнасці.

Распрацавана трохстадыяная тэхналогія прыгатавання керамзітапенабетону, на першай стадыі якой рыхтуюць цэментнае цеста, у якое пры неабходнасці ўводзяць аптымальную колькасць паскаральніка цвярдзення (1%  $CaCl_2$  ад МЦ) і ўшчыльняльную структуру цэментага каменя (1%  $Al_2(SO_4)_3$  ад МЦ) дабаўку, якія пры наступным цвярдзенні прадухіляюць усадку вяжучага – пенабетону, а ў спалучэнні з 0,5 % ад МЦ «Гідраксіпрапілметылцэлюлозы УСК-200 ТТ» – і ўсадку пена- і керамзітапенабетону пры наступным высыханні (высушванні). На другой стадыі парызуюць вяжучае, уводзячы ў цэментнае цеста пенаўтваральнік «Laston» у аптымальнай (у залежнасці ад зададзенай шчыльнасці) колькасці  $\sim 0,5$  %... 1,3 % ад МЦ, а на трэцяй стадыі ў прыгатаваную пенабетонную сумесь уводзяць керамзітавы гравій (у рацыянальнай колькасці  $\sim 0,7$  м<sup>3</sup>...0,8 м<sup>3</sup> на кубічны метр керамзітапенабетону) пры бесперапынным змешванні на працягу 60...90 с.

Распрацаваны метадыкі разліку складу пенабетону і керамзітапенабетону, абгрунтаваны рэжымы фармавання керамзітапенабетону высокай ступені аднастайнасці (каэфіцыент варыяцыі шчыльнасці і трываласці:  $v_k \leq 6,2$  % пры вытворчым фармаванні пластамі вышыняй да 1500 мм), што пацвердзіла эфектыўнасць распрацаванай тэхналогіі.

Устаноўлены ўсе неабходныя для вытворчай рэалізацыі фізіка-механічныя і эксплуатацыйныя характарыстыкі і ўласцівасці керамзітапенабетону, што пацверджана вынікамі яго практычнага прымянення ў аб'ёме  $\sim 3020$  м<sup>3</sup> у перыяд 2016–2018 гг. з эканамічнымі эфектамі  $\sim 33\ 915$  долараў ЗША (па курсе на снежань 2018 г.).

**Технология и физико-механические свойства керамзитопенобетона для монолитного и сборного строительства**

**Ключевые слова:** цемент, пенообразователь, керамзит, пенобетон, керамзитопенобетон, технология, свойства, плотность, прочность, теплопроводность.

**Цель работы:** получить эффективный теплоизоляционно-конструкционный материал – керамзитопенобетон, не подверженный осадке, обладающий пониженной средней плотностью, и разработать технологию его применения при возведении (устройстве) конструкций в построчных условиях и изготовлении сборных изделий.

В результате теоретических и экспериментальных исследований получен эффективный, не подверженный явлениям осадки и усадки теплоизоляционно-конструкционный материал – керамзитопенобетон в диапазоне основных применяемых в строительстве марок по средней плотности D300...D700, характеризующийся на 5 %...31 % большей прочностью и на 8 %...27 % модулем упругости, а также более высоким ( $\leq 31$  %) уровнем паропроницаемости и влагоотдачи (на 17 %...47 %) при меньших (на 10 %...83 %) величинах водопоглощения, сорбционной влажности и теплопроводности, по сравнению с ячеистым бетоном автоклавного твердения и пенобетоном равной плотности.

Разработана трехстадийная технология приготовления керамзитопенобетона, на первой стадии которой готовят цементное тесто, в которое при необходимости вводят оптимальное количество ускорителя твердения (1 %  $CaCl_2$  от МЦ) и уплотняющей структуру цементного камня (1 %  $Al_2(SO_4)_3$  от МЦ) добавок, которые при последующем твердении предотвращают осадку связующего – пенобетона, а в сочетании с 0,5 % от МЦ «Гидроксипропилметилцеллюлозы УСК-200 ТТ» – и усадку пено- и керамзитопенобетона при последующем высыхании (высушивании). На второй стадии поризуют связующее, вводя в цементное тесто белковый пенообразователь «Laston» в оптимальном (в зависимости от заданной плотности) количестве  $\sim 0,5$  %...1,3 % от МЦ, а на третьей стадии в приготовленную пенобетонную смесь вводят керамзитовый гравий (в рациональном количестве  $\sim 0,7$  м<sup>3</sup>...0,8 м<sup>3</sup> на кубический метр керамзитопенобетона) при непрерывном смешивании в течении 60...90 с.

Разработаны методики расчета составов пенобетона и керамзитопенобетона, обоснованы режимы формирования керамзитопенобетона высокой степени однородности (коэффициент вариации плотности и прочности:  $v_k \leq 6,2$  % при производственном формировании слоями высотой до 1500 мм), что подтверждает эффективность разработанной технологии.

Установлены все необходимые для производственной реализации физико-механические и эксплуатационные характеристики и свойства керамзитопенобетона, что подтверждено результатами его практического применения в объеме  $\sim 3020$  м<sup>3</sup> в период 2016–2018 гг. с экономическим эффектом  $\sim 33\,915$  долларов США (по курсу на декабрь 2018 г.).

## SUMMARY

Mordich Mikhail Mikhailovich

**Technology and physico-mechanical properties of expanded clay foam concrete for monolithic and prefabricated construction**

**Keywords:** cement, foaming agent, expanded clay, foam concrete, expanded clay foam concrete, technology, properties, consistence, strength, thermal conductivity.

**The Goal of Work:** To get heat-insulating and constructional material clay foam concrete with a reduced average density and to develop the technology of its application in the construction (design) of structures in building conditions and manufacture of prefabricated products.

As a result of theoretical and experimental studies, an effective thermal insulation and structural material of clay foam concrete is developed and it is not liable to the phenomena of precipitation and shrinkage. The material is in the range of main applied grades according to average density D300...D700 characterized by 5 % to 31 % greater strength and 8 % to 27 % greater modulus of elasticity as well as a higher ( $\leq 31$  %) level of vapor permeability and moisture loss (17 %...47 %) with lower (10.83 %) value of water absorption, of moisture absorption and thermal conductivity, if compared with autoclaved cellular concrete and foam concrete of equal density.

There is a three-stage technology of preparation of expanded clay concrete. During the first stage the cement dough is prepared with introducing the optimal amount of the hardening accelerator where appropriate (1%  $CaCl_2$  of MC) and sealing structure of cement stone (1 %  $Al_2(SO_4)_3$  of MC) admixtures which in the consecutive hardening prevent the residue of the binder – foam concrete. And if combined with c 0,5 % of MC «Hydroxypropylmethyl cellulose USK-200 TT» shrinkage of foam concrete and clay foam concrete with the following drying. During the second stage a binder is made by the means of adding a protein foaming agent «Laston» in optimal percentage 0,5...1,3 % of MC (according to the specified density) into the cement dough. During the third stage the expanded clay gravel is injected in the prepared foam concrete mix (in a rational amount  $\sim 0,7 \text{ m}^3 \dots 0,8 \text{ m}^3$  for a cubic meter of clay foam concrete) while continuously mixing it during 60...90 s.

The methods of calculation of compositions of foam concrete and clay foam concrete are developed. The modes of forming clay foam concrete with high degree of uniformity are proven (the coefficient of variation of density and strength:  $v_k \leq 6,2\%$  with production forming layers up to a height of 1500 mm). This confirms the effectiveness of the developed technology. The physico-mechanical and operational characteristics and properties of the expanded clay concrete are established which are necessary for production implementation. This is confirmed by the results of its practical application in the quantity of  $\sim 3020 \text{ m}^3$  in the period 2016–2018 years with the economic effect of  $\sim 33\ 915$  US dollars (at the rate of December 2018).

Научное издание

**МОРДИЧ**  
Михаил Михайлович

**ТЕХНОЛОГИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КЕРАМЗИТОПЕНОБЕТОНА ДЛЯ МОНОЛИТНОГО И СБОРНОГО  
СТРОИТЕЛЬСТВА**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия

Подписано в печать 24.10.2019. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,28. Уч. –изд. л. 1,00. Тираж 110. Заказ 773.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий №1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.