

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УДК 691.316.666 : 965-2.431

**ШАБАНОВ**  
**Дмитрий Николаевич**

**СОСТАВ И СВОЙСТВА СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДУКТОВ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Брест, 2007

Работа выполнена на кафедре строительной механики Учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

- Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор кафедры строительной механики  
Учреждения образования «Брестский государственный технический университет»  
НИКИТИН В. И.
- Официальные оппоненты – заслуженный деятель науки Республики Беларусь,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой химической технологии  
вяжущих материалов Учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический университет»  
КУЗЬМЕНКОВ М. И.
- кандидат технических наук,  
доцент кафедры технологии бетона  
и строительных материалов  
Белорусского национального  
технического университета  
ДЗАБИЕВА Л. Б.
- Оппонирующая организация – Научно-исследовательское республиканское  
унитарное предприятие «НИИСМ»

Защита состоится 18 октября 2007 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании Совета по защите диссертаций К 02.09.01 при Учреждении образования «Брестский государственный технический университет» по адресу: 224017, г. Брест, ул. Московская, 267, ауд. 323; телефон ученого секретаря (0162) 42 02 94.

Отзывы просим направлять по адресу: 224017, г. Брест, ул. Московская, 267, УО «БрГТУ», ученому секретарю Совета, тел. (0162) 42 02 94.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь Совета  
по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



В. Л. Шевчук

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Работа выполнялась в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы ГБ 0520 «Разработка силикатных материалов на базе побочных продуктов литейного производства», утверждена на Совете Учреждения образования «Полоцкий государственный университет» 07.04.2000 г., протокол № 7. Номер государственной регистрации 2000913 от 16.03.2000 г.

**Цели и задачи исследования.** Целью работы явились разработка состава и изучение эксплуатационных свойств силикатного кирпича, получаемого с использованием побочных продуктов литейного производства. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить влияние гранулометрического состава порошков отработанной формовочной смеси и ваграночного шлака на их физико-механические характеристики.
2. Оценить влияние рецептурно-технологических факторов на структурные свойства сырца и автоклавированного материала.
3. Построить экспериментально-статистические модели зависимости физико-механических характеристик силикатного кирпича от рецептурно-технологических факторов и дать их графическое изображение.
4. Оценить влияние рецептурно-технологических параметров на фазовый состав силикатного кирпича.
5. Разработать методы оценки структурной пористости материала и их влияние на показатели долговечности.
6. Установить влияние количества и основности синтезированных гидросиликатов кальция (ГСК) на долговечность автоклавированного материала.
7. Выбрать оптимальные составы силикатного кирпича и осуществить опытно-промышленное апробирование его получения.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** На защиту выносятся:

1. Результаты исследования структурно-механических свойств порошков отработанной формовочной смеси и ваграночного шлака.
2. Сырьевые составы смеси для получения силикатного кирпича с использованием отработанной формовочной смеси и ваграночного шлака, учитывающие требования действующих предприятий.
3. Экспериментально-статистические модели для оценки физико-механических характеристик сырца и автоклавированного материала и выбор на их основе промышленных составов для производства силикатного кирпича.
4. Методика оценки параметров поровой структуры по кинетике одномерного водопоглощения.

5. Методика оценки долговечности силикатного материала по его структурной пористости и данным рентгенофазового анализа.
6. Результаты опытно-промышленного внедрения, подтверждающие эффективность и экономическую целесообразность применения отходов литейного производства в получении силикатного кирпича.

**Личный вклад соискателя.** Диссертация представляет собой самостоятельный труд соискателя, выполненный на кафедре строительной механики Учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались:

- на научно-технических конференциях Одесского инженерно-строительного института, Одесса, 1983, 1984, 1985 гг.;
- на научно-практической конференции по ресурсосберегающим технологиям в технологии строительных материалов, Брянск, 1984 г.;
- на областной конференции по проблемам рационального применения материальных и топливно-энергетических ресурсов, Одесса, 1984 г.;
- на конференции «Теория и практика повышения долговечности и эффективности работы строительных конструкций сельскохозяйственных зданий и сооружений», Челябинск, 1985 г.;
- на республиканском семинаре «Повышение эффективности композиционных материалов, содержащих отходы промышленности», Одесса, 1986 г.;
- на конференции «Строительные композиционные материалы на основе отходов отраслей промышленности и энергосберегающие технологии», Липецк, 1986 г.;
- на международном научно-методическом межвузовском семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров Республики Беларусь», Могилев, 2005 г.

**Опубликованность результатов.** Основные положения диссертации и результаты исследований опубликованы в 19 печатных работах, в том числе: 6 статей в научно-технических журналах и 6 статей в сборниках научных трудов с общим объемом 1,6 авторского листа. Также в публикации входят 3 тезисов докладов на научных конференциях, 2 информационных сообщения и 2 патента.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4-х глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа содержит 164 страницы, в том числе: библиографический список из 387 наименований литературных источников (включая собственные публикации) на 27 страницах, 32 таблицы, 35 рисунков, 4 приложения на 22 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**Во введении** выполнен исторический анализ теоретических и практических исследований: получения силикатного кирпича, начиная с римских строителей и до открытия Михаэлисом гидротермального твердения с использованием природных материалов, а также техногенных отходов производства. Изложены возможности их воздействия на структуру и свойства искусственных строительных материалов за счёт изменения поверхностной активности и подбора соотношения дисперсности наполнителя и вяжущего.

**Первая глава** посвящена опыту использования техногенных отходов литейного производства в промышленности строительных материалов. В связи с этим перед исследователями стоят задачи по созданию новых искусственных строительных материалов, в которых сырьем служат отработанные формовочные смеси и ваграночный шлак.

Значительный вклад в развитие теории и практики получения силикатного кирпича гидротермального твердения с использованием отходов других производств внесли отечественные и зарубежные ученые: Х.С. Воробьев, А.В. Волженский, К.К. Куатбаев, Л.М. Хавкин, Л.Н. Попов, Г.С. Савельев, Н.П. Скукин, П.И. Боженков, Ю.Н. Бутт, Е.М. Чернышев, И.И. Крейс, Дж.Л. Калоузек, Л.С. Болквадзе, С.И. Хвостенков, К.В. Клупшас, Г.И. Книгина, Г.Г. Кюль. Исходя из особенностей получения силикатных материалов ими установлены зависимости, позволяющие использование при автоклавном твердении не только чистых кварцевых, но и полевошпатных, карбонатных песков, а также тонкоизмельченного шлака, отработанных формовочных смесей, хвостов обогащения руд и ряда других отходов промышленных производств.

Изучению структуры и оптимизации свойств композиционных строительных материалов (КСМ) посвящены работы П.А. Ребендера, В.И. Соломатова, Д.И. Штакельберга, Н.П. Воляровича, М. Ричардсона, Л.В. Радужкевича, Н.В. Урьева, в которых строительные материалы представляют собой сложные композиционные соединения. При этом выделяют микро- и макроструктурные уровни по качественному отличию физико-механических процессов их организации.

Исследования зависимости параметров долговечности от структуры материала, выполненные учеными: А.И. Панченко, А.И. Бабчином, Д.М. Ройем, А.И. Русановым, М. Трайбусом, А.П. Писаренко, П.А. Ребиндером, А.М. Подвальным, О.В. Кунцевичем, В.В. Тимашевым, С.В. Шестоперевым, показали, что они во многом зависят от влагопроницаемости. Способ, учитывающий параметры капиллярно-поровой структуры через кинетику водопоглощения, отражен в работах А.Е. Шейкина, Ю.М. Чеховского, М.И. Бруссера,

К.Ф. Фокина, характеризуется приращением массы образца во времени и определяется путем непрерывного или дискретного взвешивания.

Оптимизация инженерных решений в области строительного материаловедения и технологии, разработанная Ю.М. Баженовым, В.А. Вознесенским, В.В. Налимовым, в которой отражен системный подход, и многофакторное моделирование на основе алгоритмизированного планирования эксперимента синтезируются с физико-химической и общей теорией композиционных материалов. При оптимизации структуры, свойств и технологии изготовления композиционных материалов должно выполняться условие по экономии ресурсов при заданном уровне качества готовой продукции.

**Во второй главе** изложена постановка исследований, основывающихся на структурно-физической концепции, в соответствии с которой управление свойствами силикатных материалов определяется возможностями технологических воздействий на всю систему параметров его структуры и может быть осуществлено при раскрытии взаимодействий в цепи «структура – технология – свойства».

В диссертационной работе приведены характеристики техногенных отходов литейного производства: отработанной формовочной смеси, ваграночного шлака. Для исследования физико-механических характеристик исходных сырьевых компонентов применялись стандартные методики и оборудование.

*Силу сцепления* частиц оценивали по разрывной прочности сыпучих и слабоуплотненных порошков. Для этого использовали метод липкой смазки.

*Структурную прочность* порошков определяли по методике, основанной на пенетрации – вдавливании в образец различных штампов, с использованием пластометра Ребиндера.

На первом этапе были выполнены исследования физико-механических свойств порошков разных фракций, получаемых измельчением отработанной формовочной смеси (ОФС) и гранулированного ваграночного шлака. Полученные результаты разрывной прочности и структурной прочности порошков приведены в таблицах (1 – 2).

Таблица 1 – Разрывная прочность частиц, мг

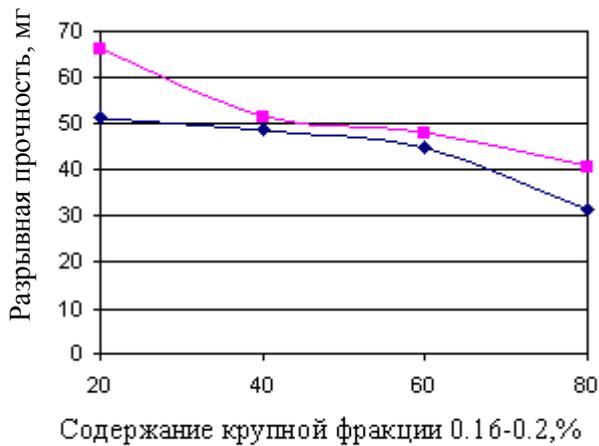
Фракция частиц, мм	0,4 и более	0,315 – 0,4	0,2 – 0,315	0,16 – 0,2	0,1 – 0,16	0,063 – 0,1	0,05 – 0,063	0,05 и менее
Отработанная формовочная смесь	8,0	21,0	28,0	23,3	27,0	34,1	44,1	53,6
Гранулированный ваграночный шлак	8,4	9,0	8,8	9,1	27,7	31,3	39,0	46,4

Таблица 2 – Структурная прочность порошков, г/см<sup>2</sup>

Фракция частиц, мм	0,4 и более	0,315 – 0,4	0,2 – 0,315	0,16 – 0,2	0,1 – 0,16	0,063 – 0,1	0,05 – 0,063	0,05 и менее
Отработанная формовочная смесь	7,8	7,6	7,2	7,4	7,7	7,5	7,6	12,4
Гранулированный ваграночный шлак	8,1	9,5	9,4	9,2	8,3	8,1	8,4	17,8

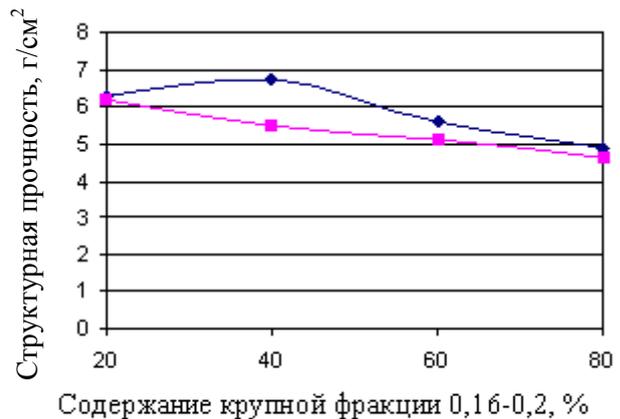
Анализ полученных результатов показал, что с увеличением дисперсности частиц происходит увеличение прочностных показателей порошков. Следует отметить, что силы сцепления частиц ОФС выше, чем у ваграночного шлака. Структурная прочность ОФС ниже структурной прочности ваграночного шлака при сопоставимых размерах частиц.

На втором этапе исследовали свойства бикомпонентных порошковых смесей, состоящих из частиц различных фракций. Полученные результаты определения разрывной и структурной прочности полученных составов приведены на рисунках 1, 2.



■ – гранулированный ваграночный шлак;  
♦ – отработанная формовочная смесь

**Рисунок 1** – Зависимость разрывной прочности двухкомпонентных порошков от количества частиц фракции 0,16 – 0,2 мм



■ – гранулированный ваграночный шлак;  
♦ – отработанная формовочная смесь

**Рисунок 2** – Зависимость структурной прочности двухкомпонентных порошков от количества частиц фракции 0,16 – 0,2 мм

Анализ полученных структурно-механических свойств порошков, состоящих из материалов разной дисперсности, показал, что введение в состав крупных фракций более мелких приводит к снижению структурной прочности порошковых смесей на 20 % и увеличению разрывной прочности на 30 % [1].

На третьем этапе исследовали физико-механические свойства многокомпонентных порошковых смесей, полученных совместным помолом сырьевых компонентов до удельной поверхности 350 м<sup>2</sup>/кг. Отличительная особенность подбора состава силикатного кирпича заключается в том, что вначале приходится проектировать состав автоклавного вяжущего. При этом подбор

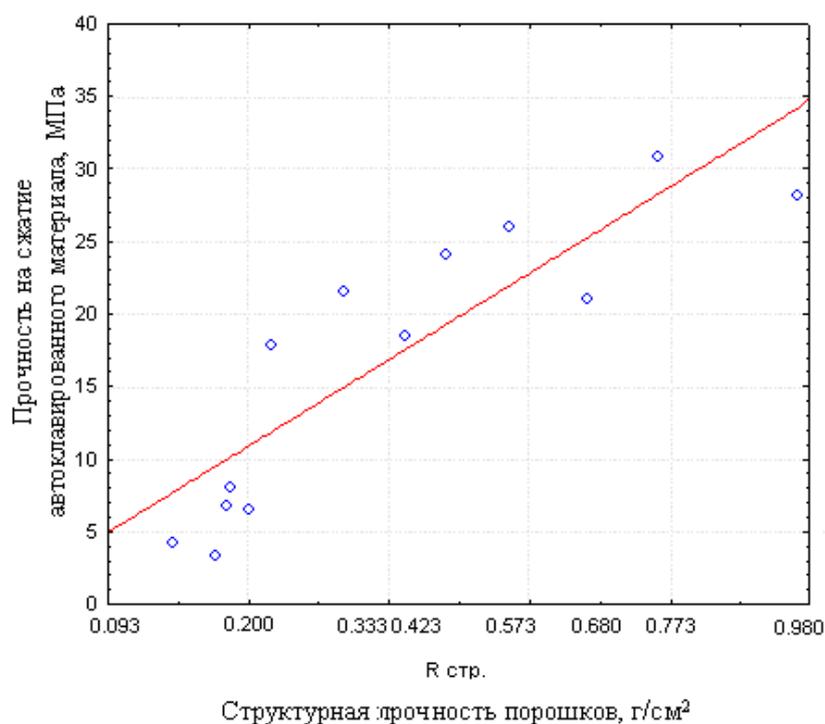
состава автоклавного вяжущего представляет собой весьма важный этап, определяющий активность вяжущего, от которой, в свою очередь, существенно зависят и физико-механические характеристики материала. Если считать, что вяжущим в автоклавных силикатных изделиях является смесь из тонкомолотых компонентов, активно участвующих в образовании цементирующего вещества и его поровой структуры, то эксплуатационные характеристики такого материала можно выразить через математическую зависимость, в которую наряду с составом вяжущего войдут и технологические факторы. Соотношение извести к отработанной формовочной смеси изменялось от 0,5 до 1,5. В качестве части вяжущего в состав сырьевой смеси вводили шлак (фракции 25 – 50 мкм, 75 – 100 мкм и 125 – 160 мкм) в количестве от 0 до 100 % от массы вяжущего.

Анализ полученных данных показал, что увеличение количества шлака в вяжущем приводит к изменению силы отрыва и структурной прочности порошков. При этом с увеличением размера частиц шлака в сырьевых смесях можно получить составы с более высокими структурно-механическими свойствами.

Увеличение отношения извести к отработанной формовочной смеси (И/ОФС) приводит к увеличению прочностных показателей автоклавированного материала с 11,8 до 30,6 МПа. Введение шлакового наполнителя в состав сырьевой смеси также способствует росту прочностных показателей.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что с использованием отработанной формовочной смеси и гранулированного ваграночного шлака можно получать силикатные материалы, прочность которых соизмерима с прочностью силикатных изделий на природных материалах и находится в пределах от 10 до 40 МПа [2].

На четвертом этапе изучалась взаимосвязь физико-механических свойств порошковых смесей и силикатного кирпича. Описание предмета исследований невозможно без знания связей между технологическими факторами и свойствами полученного материала. Для решения поставленных задач использовали методы математического моделирования, в частности методы многофакторного экспериментально-статистического моделирования, что позволило изучить влияние прочности сухих порошков на свойства готовых образцов. Для этого был поставлен эксперимент, в комплекс исследуемых свойств которого были включены: оценка структурообразующей способности ( $R_{стр}$ ) и прочностные свойства автоклавированного материала ( $R_{сж}$ ). Выполненные исследования порошков смешанных вяжущих показали зависимость  $R_{стр}$  от содержания и дисперсности наполнителя. Выполненный корреляционный анализ полученных выборочных данных позволил выявить статистически значимые корреляционные зависимости между случайными величинами  $R_{стр}$  и  $R_{сж}$ . Общая картина их взаимной изменчивости в виде корреляционного поля, включающего 15 точек, изображена на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Зависимость прочности на сжатие автоклавированного материала от полученного экспериментального значения структурной прочности порошков**

Анализ полученных результатов показал: в процессе формирования порошковых смесей образуется структура образца, которая в процессе автоклавной обработки приобретает свои прочностные характеристики. Можно сделать вывод, что значения структурных показателей прочности порошковых смесей могут служить для прогнозирования прочностных свойств готовых образцов. На этот способ получен патент оценки прочностных свойств готовых изделий по структурным показателям порошковых сырьевых смесей [3, 4, 18].

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований влияния водовяжущего отношения и удельного давления прессования на прочность сырца и автоклавированного материала. При этом видно, что максимальная прочность при сжатии сырца и автоклавированного изделия достигается при использовании сырьевых смесей с водовяжущим отношением (В/В), равным 0,2 – 0,35. Дальнейшее его увеличение приводит к снижению прочности материала.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что увеличение расхода вяжущего и удельного давления формования приводит к увеличению прочности сырца и готового изделия. При этом видно, что при разном удельном давлении прессования наибольшей прочностью сырца обладают сырьевые смеси с водовяжущим отношением, равным 0,35. То есть в данном случае происходит образование наибольшего количества контактов между частицами порошков. Наибольшей прочностью при сжатии обладают авто-

клавированные образцы, полученные из составов с водовяжущим отношением, равным 0,2. В связи с чем можно предположить, что для выбранных сырьевых составов имеет место формирование необходимой капиллярно-поровой структуры и протекание процессов гидратации частиц извести и шлака с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция и тоберморита.

Результаты полученных исследований позволили оценить влияние рецептурно-технологических факторов на свойства готового материала и определить уровни их варьирования.

Известково-шлако-кремнеземистое вяжущее (смешанное вяжущее) готовилось путем совместного помола компонентов вяжущего в шаровой мельнице до удельной поверхности 350 м<sup>2</sup>/кг. Для изучения свойств материалов был реализован насыщенный 6-ти факторный эксперимент по плану Рентшафнера. В качестве варьируемых факторов приняты: процент ввода вяжущего  $X_1$  (от 15 до 25 %); расход шлака от массы извести  $X_2$  (от 0 до 50 %); водовяжущее отношение  $X_3$  (от 0,25 до 0,45); удельное давление прессования сырца  $X_4$  (от 15 до 25 МПа); время изотермического прогрева  $X_5$  (от 4 до 7 часов); давление пара в автоклаве  $X_6$  (от 0,8 до 1,2 МПа).

В кодированных обозначениях факторов модели имеют вид:

- прочность при сжатии сырца:

$$R_{сж.сырца} = \begin{matrix} + & - & + & - & - \\ - & + & - & & \end{matrix}$$

- прочность при сжатии автоклавированного кирпича:

$$R_{сж.авт} = \begin{matrix} + & - & + & + & - & + \\ & & & & & \end{matrix}$$

- коэффициент размягчения:

$$K_{размягч.} = \begin{matrix} + & + & & & \\ & & & & \end{matrix}$$

- коэффициент морозостойкости:

$$K_{мороз.} = \begin{matrix} + & + & + & - \\ - & + & + & + \end{matrix}$$

Выполненные исследования позволили установить влияние количества вяжущего и шлакового наполнителя в нем на прочность на сжатие сырца и эксплуатационные характеристики автоклавированного материала. Введение 50 % шлакового наполнителя в вяжущее при оптимальных уровнях варьирования остальных факторов (расход вяжущего; водовяжущее отношение; удельное давление прессования) не оказывает влияние на прочность при сжатии сырца. При этом следует отметить, что при максимальном количестве вяжущего введение шлака практически не влияет на прочностные свойства готового изделия. С увеличением удельного давления формования проч-

ность силикатных изделий возрастает. Показатели коэффициента размягчения и морозостойкости автоклавированного материала, получаемого с использованием отходов литейного производства, в наибольшей степени зависят от количества вяжущего и давления пара в автоклаве. Остальные факторы на морозостойкость влияют комплексно.

По математическим моделям получены номограммы влияния расхода шлака и вяжущего на прочность автоклавированного материала, прочность сырца и коэффициент морозостойкости.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что при использовании отходов литейного производства можно получить силикатный кирпич, соответствующий требованиям СТБ 1228-2000 «Кирпич и камни силикатные».

**В четвертой главе** изложены результаты исследований структурной пористости и показателей долговечности силикатных образцов, получаемых с использованием отходов литейного производства. С этой целью была использована новая экспериментально-вычислительная методика оценки параметров, характеризующих поровую структуру и капиллярные свойства силикатных изделий, которая основывается на экспериментальных данных по их кинетике одномерного водопоглощения.

Таким образом, появилась возможность, изменяя значения влагопроводности материала, наблюдать, как изменяются значения массы образца, и сравнивать их с экспериментальными данными. Путем численного экспериментирования удалось довольно быстро добиться удовлетворительного совпадения вычисленных значений массы образца с полученными опытным путем данными (рисунок 4). С помощью зависимости коэффициента влагопроводности от функции распределения объема пор по радиусам была определена функция распределения объема пор по радиусам (рисунок 5).

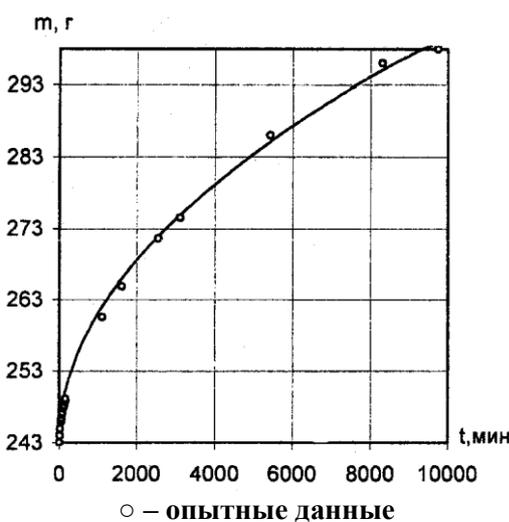


Рисунок 4 – Изменение массы образца со временем (сравнение опытных данных с расчетными)

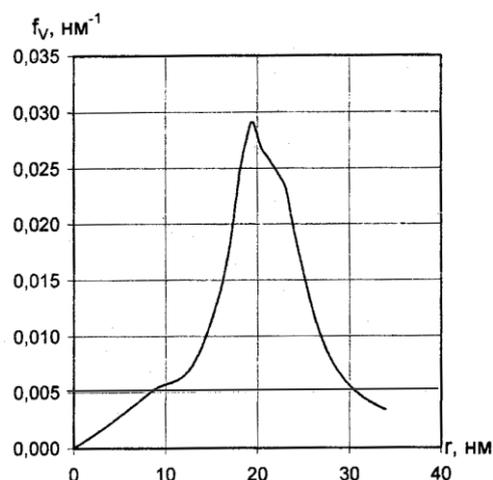


Рисунок 5 – Полученная в результате численного анализа функция распределения объема пор по радиусам для образца из автоклавированного материала

Из рисунка 5 следует, что примерно 80 % открытой пористости материала имеет поры размером от 10 до 30 нм. Такие показатели характерны для однородного мелкопористого материала. Сравнивая полученные для различных строительных материалов результаты исследования по скорости их водопоглощения, размеру пор, можно косвенно судить об их показателях долговечности.

Кроме того, по кинетике одномерного водопоглощения можно определить так называемый коэффициент сорбции  $A$ , характеризующий способность материала впитывать воду при контакте с ней.

С целью определения коэффициента сорбции воды  $A$  (рисунок 6) необходимо каждое замеренное значение приращения массы приводить к единице площади поперечного сечения образца:

$$W^* = \Delta m_t / S,$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения образца,  $\text{см}^2$ .

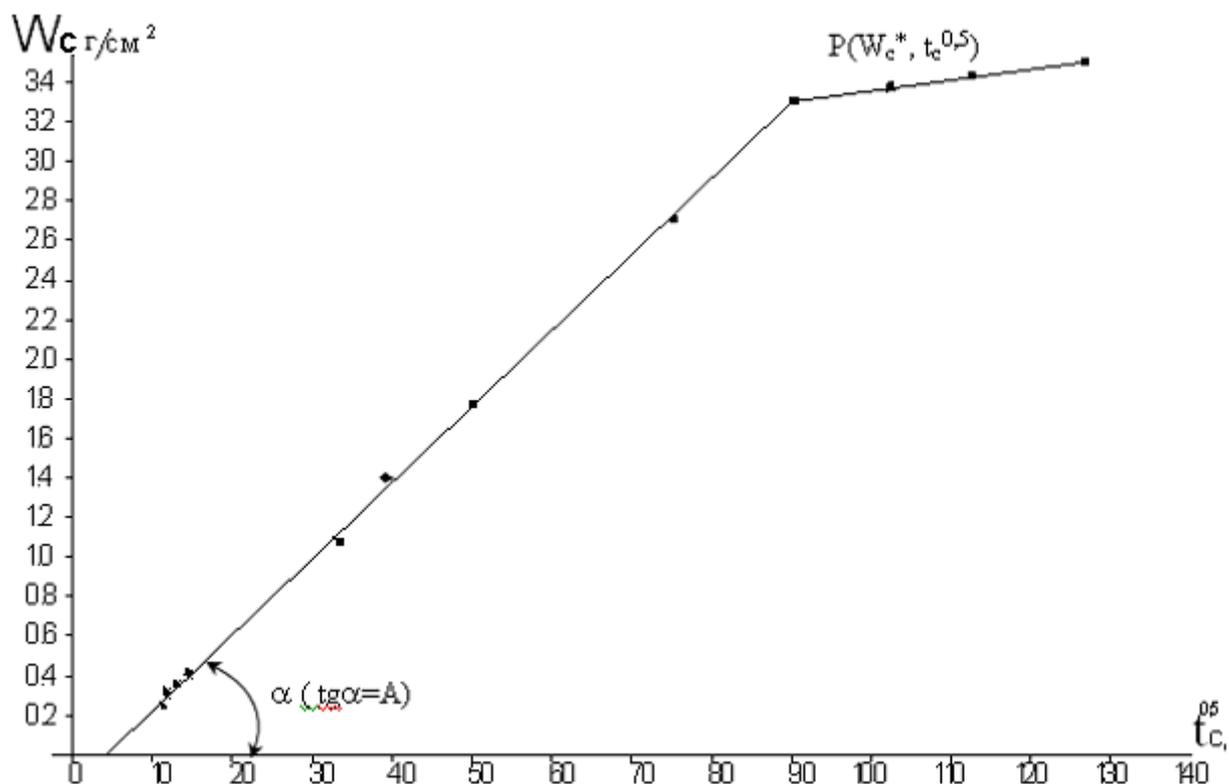


Рисунок 6 – Типичная картина капиллярного всасывания для изучаемых образцов силикатного материала

Из рисунка 6 видно, что процесс увеличения влагосодержания образцов с некоторыми погрешностями может быть описан уравнениями двух прямых, имеющих разные тангенсы угла наклона и пересекающихся в точке  $P(W_c^*, t_c)$ , и, соответственно, разделен на два основных этапа.

В общем случае одна прямая, имеющая больший угловой коэффициент, может не проходить через начало координат и иметь точку пересечения с горизонтальной осью координат  $P_0(0, t_0^{0,5})$ . Следует отметить, что для образцов из песчаника, имеющих высоту, равную 25 мм, продолжительность первого этапа составляла один-два часа, а продолжительность второго этапа достигала 230 суток. При этом кинетика водопоглощения на двух отмеченных этапах не описывается экспоненциальной зависимостью.

На первом основном этапе изучаемого процесса, имеющего практическое значение, происходит довольно быстрое капиллярное поднятие жидкости, которое прекращается после того, как фронт воды достигает верхней грани образца. При этом масса воды, поглощенная единицей объема сухого материала, в результате капиллярного подсоса распределится в нем и займет объем, который будет характеризовать активную пористость, участвующую в капиллярном всасывании воды.

Несложно предположить, что образцы материала, имеющие одинаковую пористость и различные значения коэффициента сорбции воды ( $A$ ), будут иметь различную долговечность. С помощью экспериментальных данных, полученных при исследовании лабораторных образцов силикатного кирпича, имеющего различный состав сырьевой смеси, содержащей отработанную формовочную смесь и шлак, а также промышленного силикатного кирпича на природном материале, были выполнены расчеты, результаты которых отражены в таблице 3, где в последней строке приведены данные для промышленного силикатного кирпича.

Таблица 3 – Численные значения коэффициента сорбции воды  $A$ , условного среднего радиуса пор  $r$  в зависимости от высоты исследуемого образца

Н, см	8,11	7,628	8,126	8,02	8,69	8,80	8,98	8,342	8,18	11,03	25,0
$A_{\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}^{0,5}}$	0,0558	0,0506	0,0400	0,0582	0,0262	0,0866	0,0772	0,0728	0,0540	0,0501	0,0633
$r \cdot 10^6, \text{ м}$	0,0157	0,0121	0,0116	0,0152	0,0065	0,0191	0,0094	0,0140	0,0238	0,0070	0,0171

При сравнительном анализе результатов исследований видно, что значения параметров для промышленных изделий лежат внутри диапазонов аналогичных параметров лабораторных образцов. Для промышленных изделий были выполнены порометрические исследования, на основе которых был рассчитан эффективный радиус капилляра ( $r = 0,0229$  мкм), что вполне соответствует эквивалентному радиусу, рассчитанному по предлагаемой методике.

С помощью рентгенофазового анализа изучалась полнота протекания реакций взаимодействия сырьевых материалов с образованием гидросиликатов кальция (ГСК) по количеству непрореагировавших оксида и гидроксида кальция. Было установлено также, что основными кристаллическими фазами материала являются тоберморит, кварц, низкоосновные ГСК.

Анализ фазовых составов силикатного кирпича на природном сырье (рисунок 7) и образца силикатного кирпича с использованием техногенных отходов литейного производства (рисунок 8) свидетельствует о том, что введение в состав автоклавированных силикатных изделий отходов литейного производства не приводит к изменению фазового состава готового изделия [6].

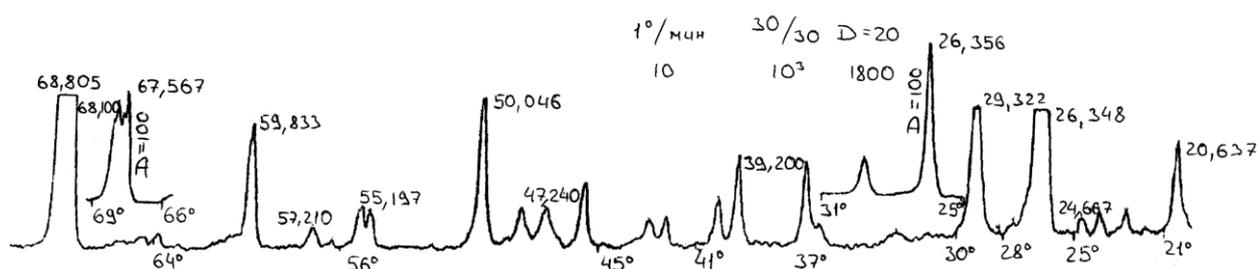


Рисунок 7 – Рентгенограмма силикатного кирпича на известково-кремнеземистом вяжущем

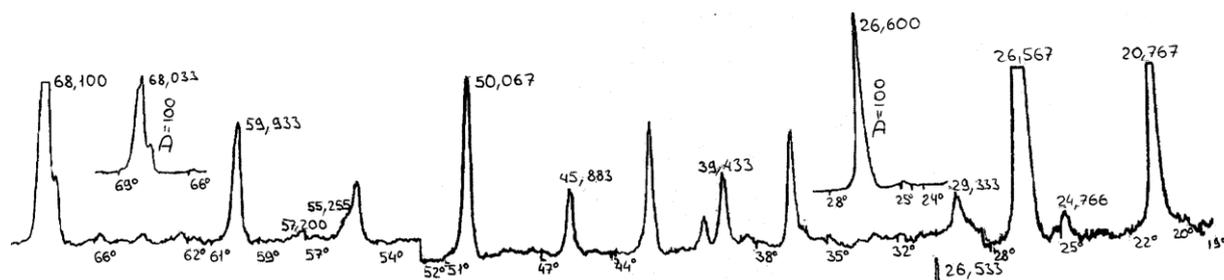
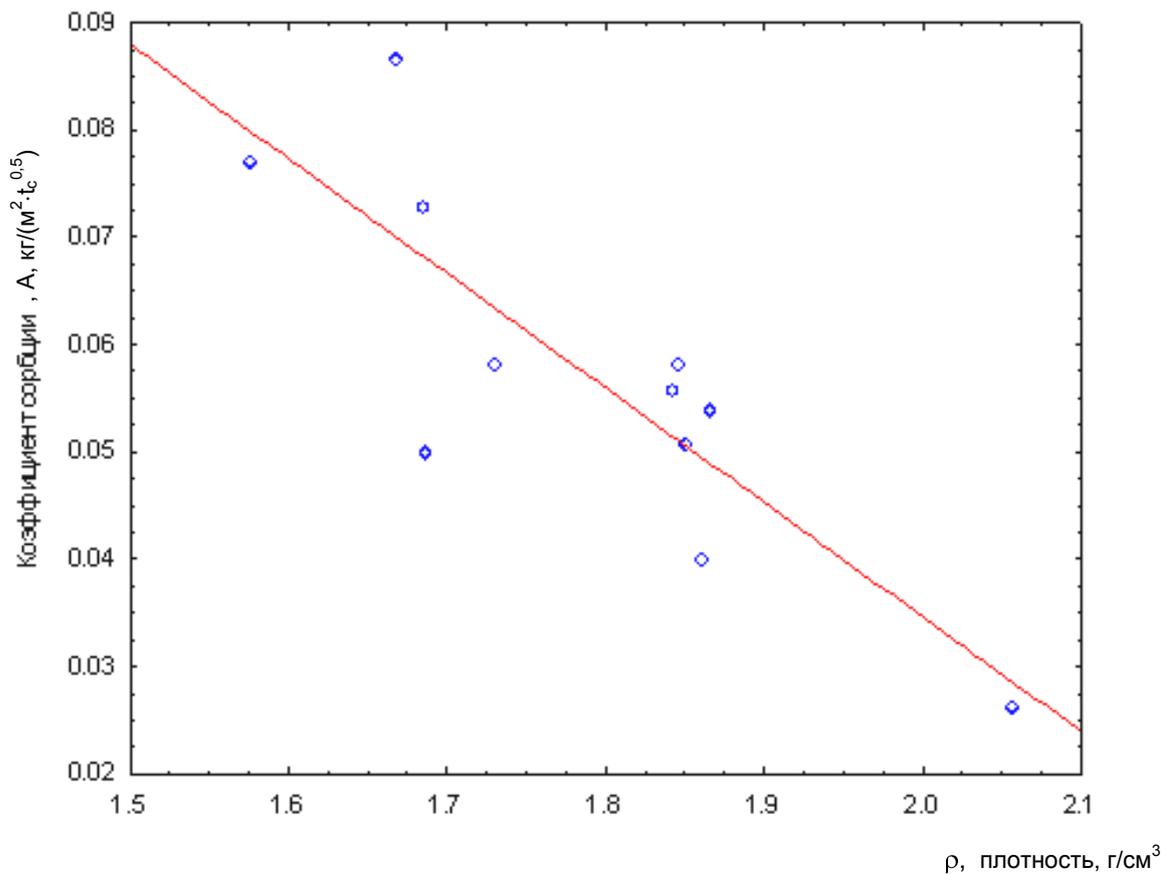


Рисунок 8 – Рентгенограмма образца, содержащего отходы литейного производства

Выполнялся корреляционный анализ полученных параметров поровой структуры и показателя морозостойкости, в результате которого была выявлена одна статистически значимая зависимость. Наиболее тесно между собой оказались связанными случайные величины среднего размера открытых капиллярных пор и коэффициента морозостойкости. По 29 точкам был определен эмпирический коэффициент линейной корреляции  $r = -$  . Полученная зависимость позволяет сделать вывод, что с увеличением размера пор морозостойкость снижается. При этом образцы, обладающие размером пор в пределах от 0 до 10 нм, показали наибольшее значение коэффициента морозостойкости. При проверке гипотезы о значимости связи между случайными величинами коэффициента сорбции ( $A$ ) и средней плотности материала ( $\rho$ ) было принято, что их совместное распределение в генеральной совокупности

является нормальным. Есть основание для рассмотренного силикатного материала использовать полученную регрессию для прогнозирования коэффициента сорбции ( $A$ ) по средней плотности  $\rho$  (рисунок 9). При проверке гипотезы о значимости связи между случайными величинами коэффициента размягчения материала ( $K_{размеч.}$ ) и коэффициента сорбции ( $A$ ) было принято, что их совместное распределение в генеральной совокупности является нормальным. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что с увеличением сорбционной способности прочность материала при увлажнении снижается.



**Рисунок 9 – Зависимость между средней плотностью ( $\rho$ ) силикатного материала и коэффициентом сорбции ( $A$ )**

Выполненные исследования по морозостойкости силикатных изделий позволили установить достаточно тесную связь коэффициента морозостойкости с коэффициентом сорбции. По полученным результатам можно сделать вывод, что на морозостойкость силикатного материала, получаемого с использованием отходов литейного производства, большое влияние оказывают различные параметры поровой структуры [8 – 12].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Подтверждена гипотеза о влиянии гранулометрии порошков на прочность отформованных изделий, при этом необходимая структурная прочность может быть достигнута при сокращении расхода извести в вяжущем вдвое за счёт введения ваграночного шлака с размером зёрен 75 – 100 мкм [1, 2].
2. Разработаны составы получения силикатного кирпича с заменой природных сырьевых материалов на отходы литейного производства, что позволило обеспечить получение силикатного кирпича, не уступающего традиционному, с использованием природного сырья, при этом существующие технологические линии не требуют какой-либо модернизации [1 – 4, 18].
3. Фазовый состав силикатного кирпича с использованием отходов литейного производства близок к минералогическому составу силикатного кирпича на кварцевом песке и не меняется в процессе длительного воздействия окружающей воздушной среды [7, 8, 13 – 15].
4. С помощью экспериментально-статистического моделирования разработаны оптимальные составы сырьевой смеси, в которой половина извести заменена шлаком, при этом физико-механические характеристики изделия обеспечиваются [16, 17].
5. Для оценки параметров поровой структуры и капиллярных свойств материала разработана методика, позволяющая прогнозировать показатели долговечности строительных материалов [5, 19].
6. Установлены статистически значимые зависимости между следующими параметрами [8 – 12]:
  - минералогическим составом автоклавированного материала и рецептурно-технологическими факторами;
  - средним размером пор и коэффициентом морозостойкости;
  - средней плотностью силикатного кирпича и коэффициентом сорбции;
  - коэффициентом размягчения и коэффициентом сорбции;
  - коэффициентом морозостойкости и коэффициентом сорбции.

### Рекомендации по промышленному использованию результатов

1. Установленная корреляционная зависимость между структурной прочностью сырьевых смесей и прочностью автоклавированного материала позволяет осуществлять промежуточный контроль качества. На данный способ получен патент [18].
2. Разработанная методика позволила продиагностировать состояние материала ограждающих конструкций по параметрам поровой структуры и капиллярным свойствам силикатного кирпича. На данный способ получен патент [19].

3. На основании имеющихся данных разработано технико-экономическое обоснование строительства технологической линии мощностью 10 млн. шт. силикатного кирпича с использованием отработанной формовочной смеси и ваграночного шлака:

Наименование элементов затрат	Единицы измерения	Затраты на годовой выпуск		Затраты на 1000 шт. кирпича	
		натуральные	в денежном выражении, руб.	натуральные	в денежном выражении, руб.
ОФС	т	40500	–	4,05	–
ГВШ	т	2000	–	0,20	–
Известь	т	2000	48580	0,20	4,86
Вода	м <sup>3</sup>	2400	552	0,24	0,055
Итого:			65832		6,58
Пар	т	5000	35000	0,50	3500
Электроэнергия	кВт	250000	7500	25,0	0,75
Основная зарплата производственных рабочих	руб.	–	129600	–	12,96
Соцстрах, 35 %	руб.	–	45360	–	4,55
Госстрах от несчастных случаев на пр-ве, 3 % от з/п	руб.	–	–	–	–
Единый налог, 4 % (чрезвычайный фонд аварии на ЧАЭС, 3 %; фонд занятости населения, 1 %)	руб.	–	–	–	–
Содержание оборудования:					
-амортизация оборудования, 10 %	руб.	–	33000	–	3,3
-эксплуатация оборудования	руб.	–	28800	–	2,88
Соцстрах, 35 %	руб.	–	1890	–	0,18
Текущий ремонт оборудования	руб.	–	24000	–	2,40
Соцстрах, 35 %	руб.	–	1890	–	0,18
Цеховые расходы:					
- содержание аппарата управления цеха	руб.	–	4800	–	0,48
Соцстрах, 35 %	руб.	–	1680	–	0,17
Амортизация здания, 2,5 %	руб.	–	3500	–	0,34
Испытания и опыты (зарплата лаборантов и ОТК)	руб.	–	1920	–	0,192
Соцстрах, 35 %	руб.	–	672	–	0,07
Итого:	руб.	–	277112	–	27,702

Себестоимость приведена в базовых ценах 1991 года.

В результате приемочных испытаний установлено, что силикатный кирпич после автоклавной обработки имел прочность при сжатии 15,6 МПа и прочность на растяжение при изгибе 3,1 МПа, что соответствует марке кирпича 150.

Водопоглощение (W) кирпича составило 12,4 %, а морозостойкость (F) – 25 циклов. Силикатный кирпич соответствует предъявленным к нему требованиям СТБ 1228-2000 «Кирпич и камни силикатные» и может быть рекомендован для массового производства.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**

### **Статьи в рецензируемых периодических изданиях**

1. Шабанов, Д.Н. Исследование структурно-механических свойств отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко // Вестн. Бел. нац. техн. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 20 – 22.
2. Шабанов, Д.Н. Структурно-механические свойства порошков, получаемых из отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2005. – № 9. – С. 114 – 120.
3. Шабанов, Д.Н. Свойства силикатного кирпича, получаемого из отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко, В.И. Никитин // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2005. – № 9. – С. 103 – 106.
4. Шабанов, Д.Н. Физико-механические свойства силикатного кирпича, получаемого на базе отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, В.И. Никитин, А.М. Иваненко // Вестн. Бел. нац. техн. ун-та. – 2006. – № 4. – С. 12 – 14.
5. Шабанов, Д.Н. Оценка параметров влажопроводности строительных материалов для теплотехнических расчетов / Д.Н. Шабанов, А.В. Афонин, В.И. Никитин // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2003. – № 2. – С. 98 – 100.
6. Шабанов, Д.Н. Эксплуатационная надежность изделий автоклавного твердения на известково-кремнеземисто-шлаковом вяжущем / Д.Н. Шабанов, Д.И. Сафончик // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2006. – № 9. – С. 72 – 75.

### **Статьи в научно-технических сборниках**

7. Шабанов, Д.Н. Силикатный кирпич, получаемый из отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. науч. тр. / Полоц. гос. ун-т; под науч. ред. Д.Н. Лазовского. – Новополоцк, 2006. – Вып. 2. – С. 52 – 55.
8. Шабанов, Д.Н. К вопросу оценки структуры силикатного кирпича, получаемого с использованием литейного производства / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. науч. тр. / Полоц. гос. ун-т; под науч. ред. Д.Н. Лазовского. – Новополоцк, 2006. – Вып. 2. – С. 56 – 59.
9. Шабанов, Д.Н. К вопросу оценки эксплуатационной пригодности автоклавированных силикатных материалов на трехкомпонентном вяжущем / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко, О.В. Коробов // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. науч. тр. / Полоц. гос. ун-т; под науч. ред. Д.Н. Лазовского. – Новополоцк, 2006. – Вып. 2. – С. 60 – 63.

10. Шабанов, Д.Н. Оценка эксплуатационной пригодности силикатного кирпича, содержащего в своем составе отходы литейного производства / Д.Н. Шабанов, Л.С. Турищев, О.В. Коробов // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. науч. тр. / Полоц. гос. ун-т; под науч. ред. Д.Н. Лазовского. – Новополоцк, 2006. – Вып. 2. – С. 63 – 67.
11. Шабанов, Д.Н. Деформативные свойства силикатных материалов на основе отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, И.Б. Сороговец // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. науч. тр. / Полоц. гос. ун-т; под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск: Технопринт, 2001. – С. 385 – 389.
12. Шабанов, Д.Н. Влияние структуры на долговечность силикатного кирпича, получаемого из отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Респ. Беларусь: сб. науч. тр. / ГУ ВПО Белорусско-Российский ун-т. – Могилев, 2005. – С. 488 – 491.

#### **Тезисы докладов**

13. Шабанов, Д.Н. Силикатный кирпич из отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, В.Н. Выровой, И.В. Барабаш // Прогрессивные ресурсосберегающие процессы в технологии строительных материалов, изделий и их контроль: Тез. докл. респ. конф. – Брянск, 1984. – С. 42 – 44.
14. Шабанов, Д.Н. Использование отходов промышленности для производства штучных силикатных изделий / Д.Н. Шабанов, И.В. Барабаш // Теория и практика повышения долговечности и эффективности работы строительных конструкций сельскохозяйственных зданий и сооружений: Тез. докл. респ. конф. – Челябинск, 1985. – С. 11.
15. Шабанов, Д.Н. Стеновой материал из отходов литейной промышленности / Д.Н. Шабанов, И.В. Барабаш // Строительные композиционные материалы на основе отходов отраслей промышленности и энергосберегающие технологии: Тез. докл. респ. конф. – Липецк, 1986. – С. 16.

#### **Информационные издания**

16. Шабанов, Д.Н. Использование отходов литейного производства в промышленности строительных материалов / Д.Н. Шабанов, В.Н. Выровой, И.В. Барабаш. – Киев: Науч.-исслед. ин-т, науч.-техн. и техн.-экон. исслед. Госпл. УССР, 1984. – 4 с. – (Информац. изд. / Одесский центр. науч.-техн. информ. и пропаганды).
17. Шабанов, Д.Н. Силикатный кирпич из отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, В.А. Вознесенский, И.В. Барабаш. – Киев: Науч.-исслед. ин-т, науч.-техн. и техн.-экон. исслед. Госпл. УССР, 1984. – 2 с. – (Информац. изд. / Одесский центр. науч.-техн. информ. и пропаганды).

#### **Патенты**

18. Способ определения прочностных характеристик силикатных изделий: пат. 5775 Респ. Беларусь, МПК7C04B28/18, G01N33/38 / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 19990323; заявл. 06.04. 99; опубл. 30.12.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 4. – С. 215.
19. Способ диагностики материала строительных изделий и конструкций: пат. 8051 Респ. Беларусь, МПК7G01N3/42 / Д.Н. Шабанов, О.В. Коробов; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 20020536; заявл. 21.06.02; опубл. 30.10.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 2. – С. 212 – 213.

## Шабанаў Дзмітрый Мікалаевіч

Састаў і ўласцівасці сілікатнай цэглы  
з выкарыстаннем прадуктаў ліцейнага прадпрыемства

Сілікатная цэгла, тэхнагенныя адыходы, шыхта, фармоўка, порыстасць, структура, капілярныя ўласцівасці, трываласць, цеплаправоднасць, стойкасць, марозатрываласць, даўгавечнасць.

*Аб'ектам даследавання з'яўляецца сілікатная цэгла, атрыманая з выкарыстаннем фармовачнай сумесі і ваграначнага шлаку. Прадметам даследавання з'яўляюцца сыравінныя саставы, фізіка-механічныя ўласцівасці шыхты, тэхналагічныя ўласцівасці сыравінных сумесей, тэхналагічных рэжымаў аўтаклаўнай апрацоўкі, фізіка-механічныя ўласцівасці сілікатнай цэглы, мінералагічны склад, порыстая структура, капілярныя ўласцівасці, паказчыкі даўгавечнасці.*

*Мэта работы – распрацоўка сілікатнай цэглы, атрыманай з выкарыстаннем тэхнагенных адыходаў ліцейнай вытворчасці. Даследаванні ажыццяўляліся з выкарыстаннем стандартных метадык і прапанаванай аўтарам эксперыментальна-вылічальнай метадыкі ацэнкі параметраў, якія характарызуюць порыстую структуру і капілярныя ўласцівасці сілікатнай цэглы, а таксама метадаў статыстычнай апрацоўкі вынікаў эксперыментаў.*

Распрацавана сілікатная цэгла, якая атрымана з выкарыстаннем адпрацаванай фармовачнай сумесі і ваграначнага шлаку з даследаваннем саставаў складанага вяжучага, у якім расход вапны зніжаны ўдвая, фармовачных уласцівасцяў сыравіннай сумесі, фізіка-механічных уласцівасцяў сілікатнай цэглы, якія адрозніваюцца тым, што з мэтай зніжэння сабекошту вырабаў і паляпшэння экалагічнай абстаноўцы прапанаваны саставы сыравінных супесей, а таксама напаўняльнік аптымальнай дысперснасці і аптымальнай колькасці.

Распрацавана эксперыментальна-вылічальная метадыка ацэнкі параметраў, што характарызуе порыстую структуру і капілярныя ўласцівасці сілікатнай цэглы, якія дазваляюць даць ацэнку паказчыкам даўгавечнасці. Усталяваны заканамернасці паміж каэфіцыентам асноўнасці сыравіннай шыхты і мінералагічным саставам сілікатнай цэглы, сярэднім параметрам пор і марозатрываласцю, шчыльнасцю і каэфіцыентам сорбцыі, каэфіцыентам сорбцыі і каэфіцыентам марозатрываласці, што дазваляе па дадзеных доседнага ўкаранення знізіць да 50 % расход вапны, да 100 % – расход прыроднага запаўняльніка, што забяспечыць сілікатнай цэгле неабходныя эксплуатацыйныя ўласцівасці і дазволіць выкарыстоўваць для іх атрымання дзеючыя тэхналагічныя лініі без іх мадэрнізацыі.

Вынікі дысертацыйнай работы выкарыстаны пры доследным укараненні па выпуску доследна-прамысловай партыі сілікатнай цэглы на Адэскім заводзе сілікатных вырабаў.

## РЕЗЮМЕ

Шабанов Дмитрий Николаевич

### Состав и свойства силикатного кирпича с использованием продуктов литейного производства

Силикатный кирпич, техногенные отходы, порошки, сырьевые смеси, влагопроводность, формуемость, пористость, структура, капиллярные свойства, прочность, теплопроводность, стойкость, морозостойкость, долговечность.

*Объектом исследования* является силикатный кирпич, полученный с использованием отработанной формовочной смеси и ваграночного шлака.

*Предметом исследования* являются сырьевые составы, физико-механические свойства порошков, свойства формовочных смесей, режимы автоклавной обработки, физико-механические свойства силикатного кирпича, минералогический состав, поровая структура, капиллярные свойства, показатели долговечности.

*Цель работы* – разработка силикатного кирпича, получаемого с использованием техногенных отходов литейного производства. Исследования осуществлялись с использованием стандартных методик и предложенной автором экспериментально-вычислительной методики оценки параметров, характеризующих поровую структуру и капиллярные свойства силикатного кирпича, а также методов математического планирования и статистической обработки экспериментов.

Разработан силикатный кирпич, получаемый с использованием отработанной формовочной смеси и ваграночного шлака, с исследованием составов известково-кремнеземисто-шлакового вяжущего, в котором расход извести сокращен вдвое, формовочных свойств сырьевой смеси, физико-механических свойств готового силикатного кирпича, отличающихся тем, что с целью снижения себестоимости и улучшения экологической обстановки предложены составы сырьевых смесей, а также наполнитель оптимальной дисперсности и оптимального количества.

Разработана экспериментально-вычислительная методика оценки параметров поровой структуры и капиллярных свойств силикатного материала, позволяющая оценивать показатели долговечности; установлены закономерности между коэффициентом основности сырьевых смесей и минералогическим составом изделий, средним размером пор и морозостойкостью, плотностью и коэффициентом сорбции, коэффициентом сорбции и коэффициентом стойкости, коэффициентом сорбции и коэффициентом морозостойкости, что позволяет по данным опытного внедрения снизить на 50 % расход извести, до 100 % – расход природного заполнителя, обеспечив изделия необходимые эксплуатационные свойства, и использовать для их получения действующие технологические линии без какой-либо их модернизации.

Результаты диссертационной работы были использованы при опытном внедрении по выпуску опытно-промышленной партии силикатного кирпича на Одесском заводе силикатных изделий.

## SUMMARY

Shabanov Dmitry Nicolaevitch

Composition and abilities of the silicate brick  
with the use of the products of the founding production

Silicate brick, wastes, powders, raw materials mixtures, porosity, structure, capillary abilities, stability, heat conductivity, stability, frost-resisting, long life.

The object of the investigation is the silicate brick made with the use of worked out the moulding mixture and cupola furnace. The subject of the investigation is technological characteristics of compositions, physical and mechanical characteristics of powders, characteristics of moulding mixtures, conditions of autoclave treatment, physical and mechanical characteristics of silicate brick, mineralogical composition, pore structure, capillary characteristics, indexes of the long life.

The aim of this study is to work out the silicate brick made with the use of technological wastes of the founding production.

The investigation was carried out using common methods and the author's experimental computing methods of parameters' estimation which characterizes the pore structure and capillary characteristics of the silicate brick. And methods of mathematical planning and statistical treatment of investigations.

As a result of this investigation there was worked out the silicate brick made with the use of worked out moulding mixture and cupola furnace with the investigation of compositions of lime silica slag of binding where the consumption of lime is decreased twice, moulding characteristics of raw material mixture, physical and mechanical characteristics of the finished silicate brick and which is differ because with the aim of the reduction of the cost price and improvement of the ecological situation they proposed compositions of raw material mixtures and also the filler of optimal amount.

It was elaborated the experimental computing method of parameter's estimation of the pore structure and capillary characteristics of the silicate material which permits to appreciate the indexes of the long life. It was established the regularities between the factor of the raw materials mixtures and mineralogical structure of articles, the middle size of pores and the frost-resisting, thickness. And the factor of frost-resisting which gives a possibility to reduce the expense of lime on 50 per cent and to reduce the expense of the natural filler on 100 per cent providing articles the necessary exploitation abilities and use for their receipt the exciting technological lines without a necessity to modernize them.

The result of this scientific work was used under experimental introducing of production of the silicate brick at Odessa factory of silicate wares.



ШАБАНОВ  
ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

СОСТАВ И СВОЙСТВА СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДУКТОВ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Редактор Р.Н. Авласенок

Подписано в печать 30.07.07. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,04.

Тираж 66 экз. Заказ 1111.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

Лицензия ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.04 г.

Лицензия ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04 г.

211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29