

**Н. В. Любомирский**  
**С. И. Федоркин**  
**А. С. Бахтин**  
**Т. А. Бахтина**  
**Е. Ю. Николаенко**  
**В. В. Николаенко**

**Конструкционные  
и теплоизоляционные  
строительные материалы  
принудительного  
карбонатного твердения  
из вторичного сырья**

КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени В.И. Вернадского  
АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

Н. В. Любомирский С. И. Федоркин А. С. Бахтин  
Т. А. Бахтина Е. Ю. Николаенко В. В. Николаенко

**Конструкционные  
и теплоизоляционные  
строительные материалы  
принудительного  
карбонатного твердения  
из вторичного сырья**

МОНОГРАФИЯ

Симферополь  
ИТ «АРИАЛ»  
2021

Рекомендовано для печати научно-техническим советом  
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»,  
протокол № 3 от 24 сентября 2020 года.

Рецензенты:

- Белов В.В.** – д.т.н., профессор, советник РААСН, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»;
- Зайченко Н.М.** – д.т.н., профессор, ректор, заведующий кафедрой технологий, строительных конструкций, изделий и материалов ГОБУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры».



Настоящее издание осуществлено при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований по проекту № 20-18-00032, не подлежит продаже

**Любомирский Н.В.**

- Л 93 Конструкционные и теплоизоляционные строительные материалы принудительного карбонатного твердения из вторичного сырья : монография / Н.В. Любомирский, С.И. Федоркин, А.С. Бахтин, Т.А. Бахтина, Е.Ю. Николаенко, В.В. Николаенко. – Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2021. – 408 с.  
ISBN 978-5-907376-33-5

В монографии представлены теоретические положения получения строительных материалов на основе известково-известняковых композиций карбонизационного типа твердения. Экспериментально подтверждена возможность изготовления конструкционных и теплоизоляционных строительных стеновых изделий по ресурсо- и энергоэффективной технологии карбонатного твердения. Развита теоретическая представления о механизме процессов образования и кристаллизации карбоната кальция при принудительной карбонизации известкового вяжущего. На основании положений химической кинетики и физико-химической механики дисперсных систем разработана математическая модель карбонизации известки, которая позволяет прогнозировать карбонизационное твердение материалов на основе известковых вяжущих в зависимости от основных технологических факторов. Особое внимание уделено вопросам установления закономерностей процессов ускоренного принудительного карбонатного твердения систем на основе портландита, формирования структуры и свойств конструкционных (с плотной структурой) и теплоизоляционных (ячейистой структуры) стеновых строительных материалов принудительного карбонатного твердения. Приведена многопараметрическая оптимизация рецептурно-технологических факторов и разработаны технологические схемы производств стеновых конструкционных и теплоизоляционных строительных изделий с требуемыми свойствами и с низкой эмиссией CO<sub>2</sub> на основе вторичного известнякового сырья и использованием антропогенного углекислого газа, как одного из способов его секвестрации.

УДК 666.9: 691.511: 691.316

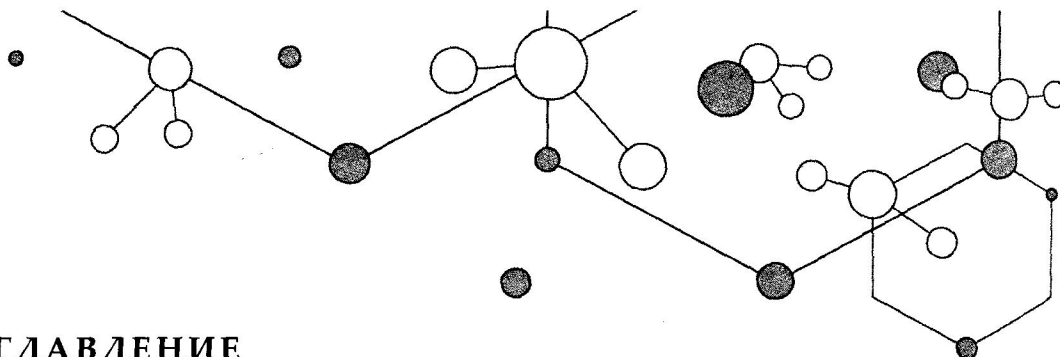
**Lyubomirskiy N.V.**

- L 93 Forced carbonate hardened structural and heat-insulating building materials from recycled materials : monograph / N.V. Lyubomirskiy, S.I. Fedorkin, A.S. Bakhtin, T.A. Bakhtina, E.Yu. Nikolaenko, V.V. Nikolaenko. – Simferopol : PP "ARIAL", 2021. – 408 p.  
ISBN 978-5-907376-33-5

The monograph presents theoretical provisions for the production of building materials based on lime and limestone compositions of the carbonization type of hardening. The possibility of manufacturing structural and heat-insulating building wall products using resource- and energy-efficient carbonate hardening technology was experimentally confirmed. Theoretical concepts of the mechanism of formation and crystallization of calcium carbonate during artificial carbonization of calcareous binder were developed. Based on the principles of chemical kinetics and physico-chemical mechanics of dispersed systems, a mathematical model of lime carbonization was developed that allows predict the carbonization hardening of materials based on calcareous binders depending on the main technological factors. Particular attention was paid to the establishment of patterns of accelerated forced carbonate hardening of systems based on portlandite, the formation of the structure and properties of structural (with a dense structure) and heat-insulating (cellular structure) wall building materials of forced carbonate hardening. Multiparameter optimization of prescription and technological factors was presented and technological schemes for the production of wall structural and heat-insulating building products with the required properties and low CO<sub>2</sub> emissions based on secondary limestone and using anthropogenic carbon dioxide as one of the methods of its sequestration were developed.

УДК 666.9: 691.511: 691.316

© Любомирский Н.В., Федоркин С.И., Бахтин А.С.,  
Бахтина Т.А., Николаенко Е.Ю., Николаенко В.В., 2021  
© ИТ «АРИАЛ», макет, оформление, 2021



## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
Литература к введению .....	8
<b>Глава 1. ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННО КАРБОНИЗИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТИ</b> .....	12
1.1. Известь как перспективное вяжущее вещество для получения водостойких и прочных строительных материалов .....	12
1.2. Физико-химические принципы формирования свойств материалов на основе известковых вяжущих .....	15
1.2.1. Силикатное твердение извести .....	17
1.2.2. Гидратационное твердение известковых вяжущих .....	22
1.2.3. Карбонизационное твердение извести .....	25
1.3. Структурообразование и формирование свойств материалов на основе извести .....	31
1.3.1. Процессы кристаллизации и формирования кристаллической структуры .....	32
1.3.2. Формирование структуры и свойств с учетом кинетики структурообразования .....	40
1.4. Возможные направления получения принудительно карбонизированных композиционных строительных материалов на основе извести .....	45
Литература к главе 1 .....	51
<b>Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	64
2.1. Материалы, применяемые в исследовании .....	64
2.1.1. Известь .....	65
2.1.2. Портландцемент .....	67

2.1.3. Карбонатное вторичное сырье .....	68
2.1.4. Кварцевый песок .....	70
2.1.5. Алюминиевая пудра .....	70
2.1.6. Углекислый газ .....	71
2.2. Методы исследования процессов карбонизации известковых систем и изготовление опытных образцов .....	71
2.3. Методы исследования структуры и свойств карбонизированных образцов и изделий .....	84
2.4. Методика исследования газобетонных смесей и образцов газобетона .....	90
2.5. Методика планирования эксперимента .....	94
Литература к главе 2 .....	95
*	
<b>Глава 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ ИЗВЕСТКОВЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>98</b>
3.1. Физико-химические процессы образования карбоната кальция при принудительной карбонизации известьсодержащих систем .....	98
3.2. Кристаллизация карбоната кальция при принудительной карбонизации гидроксида кальция .....	104
3.3. Термодинамическое обоснование процесса карбонизации извести .....	110
3.4. Математическое моделирование процесса карбонизации извести .....	118
3.4.1. Построение математической модели карбонизации известкового вяжущего .....	119
3.4.2. Компьютерный анализ математической модели .....	131
3.5. Выводы .....	139
Литература к главе 3 .....	140
<b>Глава 4. КИНЕТИКА КАРБОНИЗАЦИИ ИЗВЕСТИ .....</b>	<b>144</b>
4.1. Карбонизация извести в среде повышенных концентраций углекислого газа .....	144

---

4.2. Физико-химическое обоснование выбора кинетических уравнений .....	167
4.3. Кинетика карбонизации известкового вяжущего .....	169
4.3.1. Влияние водосодержания на скорость карбонизации .....	169
4.3.2. Температурная зависимость скорости карбонизации .....	176
4.3.3. Зависимость скорости карбонизации от давления .....	184
4.3.4. Коэффициент диффузии углекислого газа в известковых образцах при их принудительной карбонизации .....	193
4.4. Выводы .....	205
Литература к главе 4.....	206
<b>Глава 5. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КАМНЯ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТИ КАРБОНИЗАЦИОННОГО ТИПА ТВЕРДЕНИЯ .....</b>	<b>208</b>
5.1. Влияние факторов принудительной карбонизации известкового вяжущего на свойства получаемого камня .....	208
5.2. Исследование структуры искусственного каменного материала, получаемого в результате принудительной карбонизации известкового вяжущего .....	218
5.3. Влияние концентрации CO <sub>2</sub> на структурообразование и свойства искусственного карбонатного камня на основе известкового вяжущего .....	231
5.4. Выводы .....	241
Литература к главе 5.....	243
<b>Глава 6. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАРБОНАТНОГО ТВЕРДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТИ И ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ .....</b>	<b>244</b>
6.1. Материалы полусухого прессования на основе извести и отходов камнепиления известняков .....	245
6.1.1. Структурообразование принудительно карбонизируемых известково-известняковых композиций с учетом генезиса известнякового наполнителя .....	245

6.1.1.1. Влияние примесей природных известняков на процесс карбонизации извести в зависимости от их генезиса .....	245
6.1.1.2. Влияние известнякового наполнителя на структурообразование и свойства материалов, твердеющих при повышенных концентрациях CO <sub>2</sub> .....	249
6.1.1.3. Структурообразование известково-известняковых композиций карбонизационного твердения .....	256
6.1.2. Зависимость свойств известково-известняковых материалов карбонизационного твердения от рецептурно-технологических факторов .....	265
6.1.2.1. Влияние характеристик карбонатного наполнителя на свойства известково-известняковых композиций карбонизационного твердения .....	266
6.1.2.2. Влияние режимов карбонизационного твердения на формирование физико-механических свойств известково-известняковых композиций .....	273
6.1.2.3. Влияние режимов перемешивания сырьевых смесей на свойства известково-известняковых композиций карбонизационного типа твердения .....	304
6.1.3. Прочностные и деформативные свойства известково-известняковых композиций полусухого прессования карбонатного твердения .....	306
6.1.4. Выводы .....	315
6.2. Неавтоклавный газобетон на основе извести и отходов камнепиления известняков, твердеющий на стадии принудительной карбонизации: разработка составов, структурообразование и свойства .....	317
6.2.1. Формирование ячеистой структуры газобетона на основе смешанного известково-цементного вяжущего и известнякового заполнителя .....	317

6.2.1.1. Влияние применения дисперсных известняковых отходов в качестве заполнителя на прочностные свойства межпорового вещества газобетона .....	318
6.2.1.2. Влияние содержания извести в поризуемой смеси на кинетику процесса газообразования .....	324
6.2.1.3. Влияние текучести и температуры известково-цементной смеси на процесс ее поризации .....	327
6.2.1.4. Оптимизация основных технологических параметров получения газобетона на известково-цементном вяжущем .....	331
6.2.1.5. Влияние известнякового заполнителя на формирование ячеистой макроструктуры газобетона на основе смешанного известково-цементного вяжущего .....	337
6.2.2. Реологические свойства газобетонной смеси .....	342
6.2.3. Исследование структуры и фазового состава газобетона на основе известково-цементного вяжущего и известнякового заполнителя, твердеющего на стадии принудительной карбонизации .....	347
6.2.4. Физико-механические и теплофизические свойства газобетона на основе известково-цементного вяжущего и известнякового заполнителя в зависимости от режимов твердения .....	356
6.2.5. Выводы .....	363
Литература к главе 6.....	365
<b>Глава 7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО СТЕНОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАРБОНАТНОГО ТВЕРДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТИ И ВТОРИЧНОГО ИЗВЕСТНЯКОВОГО СЫРЬЯ .....</b>	<b>372</b>
7.1. Стеновые изделия карбонатного твердения полусухого прессования .....	372
7.1.1. Оптимизация технологических факторов получения прессованных известково-известняковых материалов карбонизационного твердения с заданными свойствами .....	372



7.1.2. Технология изготовления карбонизированных известково-известняковых материалов полусухого прессования .....	381
7.1.3. Опытнo-промышленное внедрение технологии производства прессованных карбонизированных стеновых изделий на основе известково-известняковых композиций .....	384
7.2. Теплоизоляционные изделия карбонатного твердения .....	388
7.2.1. Разработка технологии производства теплоизоляционного строительного материала – газокarbonата, твердеющего в среде повышенной концентрации углекислого газа .....	388
7.2.2. Опытнo-промышленная проверка технологии газобетона карбонизационного твердения на основе известково-цементного вяжущего и известнякового заполнителя .....	391
7.2.3. Техничo-экономическое обоснование технологии производства и применения изделий из газобетона карбонизационного твердения .....	394
Литература к главе 7 .....	396
<b>ОБЩИЕ ВЫВОДЫ</b> .....	398