

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **035865**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2020.08.21**

(21) Номер заявки  
**201990521**

(22) Дата подачи заявки  
**2017.09.26**

(51) Int. Cl. **C04B 40/02** (2006.01)  
**B28B 11/24** (2006.01)  
**C04B 22/10** (2006.01)  
**C04B 12/00** (2006.01)  
**B01J 19/24** (2006.01)

---

(54) **УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОТВЕРЖДЕНИЯ И СПОСОБЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

---

(31) **62/399,949**

(32) **2016.09.26**

(33) **US**

(43) **2019.09.30**

(86) **PCT/US2017/053539**

(87) **WO 2018/058139 2018.03.29**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**СОЛИДИЯ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК.**  
**(US)**

(72) Изобретатель:  
**Куинн Шон Кэмрон, Смит Кеннет**  
**Майкл, Паттен Девин М., Ху Сюйдун,**  
**Перри Джордж, Атакан Вахит, Джаин**  
**Джитендра, Сет Анудж, Таш Ахмет**  
**Джунейт, Блэклук Алан Томас, Шулер**  
**Томас, Грутенбоер Кристофер Дж.,**  
**Касторо Дэн (US)**

(74) Представитель:  
**Нилова М.И. (RU)**

(56) **US-A1-2015/0336852**  
**US-A1-2015/0225295**  
**US-A1-2014/0322083**  
**WO-A2-2016/022522**  
**US-A1-2014/0116295**  
**US-A1-5518540**  
**US-A1-2017/0102373**

---

(57) Описаны устройства и способы усовершенствования процесса отверждения материалов, отверждаемых в результате реакции с CO<sub>2</sub> и не отверждаемых при наличии одной только воды, и приведены примеры.

---

**B1**

**035865**

**035865**  
**B1**

### Перекрестная ссылка на родственные заявки

Настоящая заявка испрашивает приоритет и преимущество по одновременно рассматриваемой предварительной заявке на патент США № 62/399949, поданной 26 сентября 2016 г., каждая из которых полностью включена в настоящий документ посредством ссылки.

### Область техники

Изобретение в целом относится к оборудованию для отверждения, а в частности, к оборудованию для отверждения, используемому с материалами, отверждающимися в результате реакции с  $\text{CO}_2$ .

### Уровень техники

Из уровня техники известны системы и способы отверждения материалов с использованием  $\text{CO}_2$  в качестве реагента.

В публикации J.M. Bukowski и R.L. Berger, Исследования цемента и бетона (Cement and Concrete Research), Vol. 9, pp. 57-68, январь 1979, описана карбонизация негидравлических,  $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$  и  $\text{CaSiO}_3$ , строительных растворов и порошков, подвергнутых воздействию сред со 100% относительной влажностью (RH, relative humidity) и 100%  $\text{CO}_2$ . Скорость реакции и нарастание прочности выше в  $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ , чем в  $\text{CaSiO}_3$ . Увеличение давления  $\text{CO}_2$  относительно атмосферного до 5,62 МПа [55,5 атм, или 815 фунтов на кв. дюйм] увеличивает степень реакции как  $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ , так и  $\text{CaSiO}_3$ . Прочность нарастает в зависимости от степени реакции и давления  $\text{CO}_2$  свыше 2,00 МПа. Описано возможное использование негидравлических материалов для цементов, активированных  $\text{CO}_2$ .

Также известна публикация международной заявки на патент WO 2017/041188 A1 авторов Al-Ghoulh и др., опубликованная 16 марта 2017 г., в которой описан процесс производства сборных изделий в воздухопроницаемом кожухе, который включает этапы карбонизации предварительно высушенных блоков из сборного бетона путем подачи газообразного  $\text{CO}_2$  в закрытый воздухопроницаемый кожух при давлении, близком к атмосферному давлению (между 0 и 2 фунтов на кв. дюйм изб. (0-13,79 кПа)), и/или пониженном давлении (между 2 и 15 фунтов на кв. дюйм изб. (13,79-103,4 кПа)), причем указанные предварительно высушенные бетонные блоки потеряли от 25 до 60% содержания воды в исходной смеси.

Существует потребность в оборудовании и способах отверждения, которые обеспечивают улучшенное отверждение материалов, отверждаемых в результате реакции с  $\text{CO}_2$ .

### Сущность изобретения

Согласно одному аспекту изобретения предложено устройство для отверждения материалов, отверждаемых в результате реакции с  $\text{CO}_2$ , содержащее

камеру отверждения, выполненную с возможностью содержания материала, потребляющего  $\text{CO}_2$  в качестве реагента и не отверждающегося при отсутствии  $\text{CO}_2$  во время отверждения, при этом указанный материал не отверждается при наличии одной только воды и не потребляет воду во время отверждения, камера отверждения имеет по меньшей мере одно отверстие, выполненное для обеспечения обеспечения введения материала в камеру отверждения и удаления из нее, и имеет по меньшей мере одну крышку для отверстия, причем крышка выполнена с возможностью обеспечения атмосферного уплотнения при закрывании, чтобы предотвратить загрязнение газа, находящегося в камере отверждения, газом, находящимся вне камеры отверждения;

источник диоксида углерода или воздуха, выполненный с возможностью подачи газообразного диоксида углерода или воздуха в камеру отверждения через входное отверстие для газа в камере отверждения, причем источник диоксида углерода или воздуха имеет по меньшей мере одно устройство регулирования потока, выполненное с возможностью управления расходом газообразного диоксида углерода или воздуха, подаваемого в камеру отверждения;

подсистему циркуляции газа, выполненную с возможностью обеспечения циркуляции газообразного диоксида углерода или воздуха через камеру отверждения;

подсистему регулирования температуры, выполненную с возможностью регулирования температуры газа внутри камеры; подсистему регулирования влажности, выполненную с возможностью регулирования влажности газа в камере; и

по меньшей мере один контроллер, связанный по меньшей мере с одним из следующего: источником диоксида углерода, подсистемой циркуляции газа, подсистемой регулирования температуры и подсистемой регулирования влажности,

причем по меньшей мере один контроллер выполнен с возможностью независимого регулирования, по меньшей мере, соответствующего одного из следующего: расхода газа внутри камеры, циркуляции газа через камеру отверждения, температуры газа и влажности газа,

при этом по меньшей мере один контроллер выполнен с возможностью обеспечения времени пребывания на первом этапе сушки (этап 1), причем время пребывания на первом этапе сушки подобрано так, чтобы быть минимальным, и по меньшей мере один контроллер выполнен с возможностью перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) в конце первого этапа сушки (этап 1).

Абсолютное давление процесса отверждения, выполняемого в указанной камере, имеет место при

давлениях в диапазоне от 0,1 атм до абсолютного давления ниже 5 атм, чтобы избежать использования сложных компонентов, рассчитанных на высокое давление. Предпочтительно процесс протекает при абсолютном давлении 0,68-1,36 атм (10-20 фунтов на кв. дюйм). Более предпочтительно процесс протекает при абсолютном давлении 0,98-1,02 атм (14,5-14,9 фунтов на кв. дюйм).

В одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью первоначального прохождения материалом первого этапа сушки (этап 1) при отсутствии преднамеренно добавленного CO<sub>2</sub>.

В другом варианте реализации устройство выполнено с возможностью первоначального прохождения материалом первого этапа сушки (этап 1) при наличии CO<sub>2</sub>.

Еще в одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) путем определения изменения одного или более электрических свойств материала на его поверхности или в его основной массе.

Еще в одном варианте реализации одно или более электрических свойств материала включают в себя по меньшей мере один из следующих параметров: поверхностное удельное сопротивление, объемное удельное сопротивление, электропроводность, полное сопротивление, емкость, диэлектрическая постоянная, диэлектрическая прочность, диэлектрическая проницаемость, пьезоэлектрическая постоянная и коэффициент термоэдс.

В дополнительном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения количества воды, которая удаляется из материала.

В дополнительном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения пропорции воды, удаляемой из материала.

В дополнительном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения пропорции воды, аккумулированной из газа, циркулирующего в камере.

Еще в одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения по меньшей мере одного из следующего: концентрации CO<sub>2</sub> и концентрации O<sub>2</sub> в газе, циркулирующем в камере.

Еще в одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения относительной влажности газа, циркулирующего в камере.

В одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения температуры газа, циркулирующего в камере.

Еще в одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения температуры материала.

Еще в одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью мониторинга изменения температуры материала с использованием инфракрасной камеры.

Еще в одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения давления внутри камеры.

Еще в одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью измерения, отслеживания и регулирования давления внутри камеры на протяжении всего процесса на каком-либо из первого этапа сушки (этап 1) и второго этапа отверждения (этап 2).

В дополнительном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения уровня pH материала.

Еще в одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения уровня pH воды, аккумулированной во время отверждения материала.

Еще в одном дополнительном варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения элементного состава материала.

В одном варианте реализации устройство выполнено с возможностью измерения, отслеживания и регулирования элементного состава материала на протяжении всего процесса на каком-либо из первого этапа сушки (этап 1) и второго этапа карбонизации (этап 2).

В другом варианте реализации устройство выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения реакции материала на ультразвуковое стимулирование.

Еще в одном варианте реализации подсистема регулирования температуры дополнительно содер-

жит по меньшей мере один источник энергии, выполненный с возможностью нагрева по меньшей мере одного из газа и материала.

Еще в одном варианте реализации подсистема регулирования температуры выполнена с возможностью регулирования температуры материала, пропорции воды, удаляемой на первом этапе сушки (этап 1), и скорости реакции на втором этапе карбонизации (этап 2).

В дополнительном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью управления временем пребывания по меньшей мере на одном из первого этапа сушки (этап 1) и второго этапа карбонизации (этап 2).

Еще в одном дополнительном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования сжигания ископаемого топлива.

В дополнительном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования нагрева за счет электрического сопротивления.

Еще в одном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования инфракрасного источника тепла.

Еще в одном дополнительном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования лазера.

В одном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования диэлектрического нагрева.

В другом варианте реализации в источнике энергии, выполненном с возможностью использования диэлектрического нагрева, использованы волны микроволновой частоты или радиочастотные волны.

Еще в одном варианте реализации в источнике энергии, выполненном с возможностью использования диэлектрического нагрева, использованы радиочастоты в промышленной, научной и медицинской полосе частот (диапазон ISM, Industrial, Science and Medical band).

Еще в одном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования плазменного нагрева.

В дополнительном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования нагрева паром.

Еще в одном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования перегретого пара.

В дополнительном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования проводимости.

Еще в одном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования излучателя.

В дополнительном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования источника лучистого нагрева.

В одном варианте реализации источник энергии выполнен с возможностью использования установки для когенерации энергии.

В другом варианте реализации подсистема регулирования влажности выполнена с возможностью регулирования извлечения воды из материала.

Еще в одном варианте реализации подсистема регулирования влажности выполнена с возможностью регулирования извлечения воды из газа в камере в течение по меньшей мере одного из первого этапа сушки (этап 1) и второго этапа карбонизации (этап 2).

Еще в одном варианте реализации подсистема регулирования влажности выполнена с возможностью регулирования извлечения воды с использованием естественной конвекции.

В дополнительном варианте реализации подсистема регулирования влажности выполнена с возможностью регулирования извлечения воды с использованием принудительной конвекции.

Еще в одном варианте реализации подсистема регулирования влажности выполнена с возможностью регулирования извлечения воды с использованием компрессора.

В дополнительном варианте реализации подсистема регулирования влажности выполнена с возможностью регулирования извлечения воды с использованием осушителя.

Еще в одном варианте реализации подсистема регулирования влажности выполнена с возможностью регулирования извлечения воды с использованием одного из теплообменника и охладителя.

В дополнительном варианте реализации подсистема регулирования влажности выполнена с возможностью регулирования извлечения воды с использованием давления, меньшего, чем атмосферное давление.

В одном варианте реализации подсистема циркуляции газа выполнена с возможностью регулирования циркуляции газа в камере, чтобы регулировать удаление воды на первом этапе сушки (этап 1).

В другом варианте реализации подсистема циркуляции газа выполнена с возможностью регулирования потока и скорости газа, находящихся рядом с материалом.

Еще в одном варианте реализации подсистема циркуляции газа выполнена с возможностью регулирования циркуляции газа в камере, чтобы регулировать скорость реакции на втором этапе карбонизации (этап 2).

Еще в одном варианте реализации подсистема циркуляции газа выполнена с возможностью регулирования потока и скорости газа с использованием системы нагнетательной вентиляции.

В дополнительном варианте реализации подсистема циркуляции газа выполнена с возможностью регулирования потока и скорости газа с использованием внутренней системы циркуляции.

Еще в одном варианте реализации внутренняя система циркуляции содержит вентилятор.

В дополнительном варианте реализации подсистема циркуляции газа выполнена с возможностью регулирования потока и скорости газа с использованием внешней системы циркуляции.

Еще в одном варианте реализации внешняя система циркуляции содержит вентилятор.

Еще в одном дополнительном варианте реализации устройство содержит внутреннюю систему циркуляции, внешнюю систему циркуляции и обходной контур, выполненный с возможностью пропорционального распределения потока газа между внутренней системой циркуляции и внешней системой циркуляции.

В одном варианте реализации устройство содержит множество внутренних систем циркуляции, множество внешних систем циркуляции, множество нагревателей и множество систем осушения с образованием множества независимых зон управления внутри камеры отверждения.

В другом варианте реализации устройство регулирования потока газа выполнено с возможностью изменения концентрации  $\text{CO}_2$  во время первого этапа сушки (этап 1) и второго этапа карбонизации (этап 2), чтобы максимизировать эффективность потребления  $\text{CO}_2$  во время процесса отверждения.

Еще в одном варианте реализации концентрация  $\text{CO}_2$  уменьшается во время второго этапа карбонизации (этап 2).

Согласно другому аспекту изобретение относится к способу отверждения материала, потребляющего  $\text{CO}_2$  в качестве реагента и не отверждающегося при отсутствии  $\text{CO}_2$  во время отверждения, при этом материал не отверждается при наличии одной только воды и не потребляет воду во время отверждения, при этом способ включает следующие этапы:

обеспечение устройства, содержащего

камеру отверждения, выполненную с возможностью содержания материала, потребляющего  $\text{CO}_2$  в качестве реагента, причем материал не отверждается при отсутствии  $\text{CO}_2$  во время отверждения, причем материал не отверждается при наличии одной только воды и не потребляет воду во время отверждения, камера отверждения имеет по меньшей мере одно отверстие, выполненное для обеспечения введения материала в камеру отверждения и удаления из нее, и имеет по меньшей мере одну крышку для отверстия, причем крышка выполнена с возможностью обеспечения атмосферного уплотнения при закрывании, чтобы предотвратить загрязнение газа, находящегося в камере отверждения, газом, находящимся вне камеры отверждения;

источник диоксида углерода или воздуха, выполненный с возможностью подачи газообразного диоксида углерода или воздуха в камеру отверждения через входное отверстие для газа в камере отверждения, причем источник диоксида углерода или воздуха имеет по меньшей мере одно устройство регулирования потока, выполненное с возможностью управления расходом газообразного диоксида углерода или воздуха, подаваемого в камеру отверждения;

подсистему циркуляции газа, выполненную с возможностью обеспечения циркуляции газообразного диоксида углерода или воздуха через камеру отверждения;

подсистему регулирования температуры, выполненную с возможностью регулирования температуры газа внутри камеры;

подсистему регулирования влажности, выполненную с возможностью регулирования влажности газа в камере; и

по меньшей мере один контроллер, связанный по меньшей мере с одним из следующего: источником диоксида углерода, подсистемой циркуляции газа, подсистемой регулирования температуры и подсистемой регулирования влажности,

при этом по меньшей мере один контроллер выполнен с возможностью независимого регулирования по меньшей мере соответствующего одного из следующего: подачи газа внутрь камеры, циркуляции газа через камеру отверждения, температуры газа и влажности газа,

при этом по меньшей мере один контроллер выполнен с возможностью обеспечения времени пребывания на первом этапе сушки (этап 1), причем время пребывания на первом этапе сушки подобрано так, чтобы быть минимальным, и по меньшей мере один контроллер выполнен с возможностью перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) в конце первого этапа сушки (этап 1),

причем способ также включает

выполнение первого этапа сушки, имеющего первое время пребывания на первом этапе сушки, и выполнение второго этапа отверждения в конце первого этапа сушки.

В одном аспекте изобретение относится к устройству для отверждения материалов, упрочняемых в результате реакции с  $\text{CO}_2$  и не упрочняемых при наличии одной только воды, содержащему камеру отверждения, выполненную с возможностью содержания материала, потребляющего  $\text{CO}_2$  в качестве реагента, и, по существу, не упрочняемого при отсутствии  $\text{CO}_2$ , причем указанная камера отверждения име-

ет по меньшей мере одно отверстие, выполненное с возможностью введения указанного материала в камеру отверждения и его удаления из нее, и имеет по меньшей мере одну крышку для указанного отверстия, при этом указанная крышка выполнена с возможностью обеспечения атмосферного уплотнения при закрывании, чтобы предотвратить загрязнение газа, находящегося в указанной камере отверждения, газом, находящимся вне указанной камеры отверждения;

источник диоксида углерода или воздуха, выполненный с возможностью подачи газообразного диоксида углерода или воздуха в указанную камеру отверждения через входное отверстие для газа в указанной камере отверждения, причем указанный источник диоксида углерода или воздуха имеет по меньшей мере одно устройство регулирования потока, выполненное с возможностью управления причем расходом газообразного диоксида углерода или воздуха, подаваемого в указанную камеру отверждения;

подсистему циркуляции газа, выполненную с возможностью обеспечения циркуляции указанного газа через камеру отверждения с регулируемой подачей и скоростью;

подсистему регулирования температуры, выполненную с возможностью регулирования температуры указанного газа внутри указанной камеры;

подсистему регулирования влажности, выполненную с возможностью регулирования влажности указанного газа в указанной камере; и

по меньшей мере один контроллер, связанный по меньшей мере с одним из указанного источника диоксида углерода, указанной подсистемой циркуляции газа, указанной подсистемой регулирования температуры и указанной подсистемой регулирования влажности,

причем указанный по меньшей мере один контроллер выполнен с возможностью независимого регулирования, по меньшей мере, соответствующего одного из следующего: указанного расхода газа внутри камеры, указанной циркуляции указанного газа через указанную камеру отверждения, указанной температуры указанного газа и указанной влажности указанного газа, чтобы уменьшить время пребывания на первом этапе сушки (этап 1), и выполнен с возможностью выполнения второго этапа карбонизации (этап 2) в конце указанного первого этапа сушки (этап 1).

В другом аспекте изобретение относится к способу отверждения материалов, упрочняемых в результате реакции с  $\text{CO}_2$ , и не упрочняемых при наличии одной только воды, включающему этапы: выполнение первого этапа сушки (этап 1), имеющего сокращенное время пребывания на указанном первом этапе сушки (этап 1), и выполнение второго этапа карбонизации (этап 2) в конце указанного первого этапа сушки (этап 2).

В другом аспекте изобретение относится к способу отверждения материалов, упрочняемых в результате реакции с  $\text{CO}_2$ , и не упрочняемых при наличии одной только воды, включающему этапы: выполнение первого этапа сушки (этап 1), имеющего сокращенное время пребывания на указанном первом этапе сушки (этап 1), выполнение второго этапа карбонизации (этап 2) в конце указанного первого этапа сушки (этап 2), и повторение первого этапа сушки (этап 1) и второго этапа карбонизации (этап 2) по меньшей мере один раз.

В одном варианте реализации изобретение относится к способу отверждения материалов, упрочняемых в результате реакции с  $\text{CO}_2$ , и не упрочняемых при наличии одной только воды, включающему этапы: выполнение первого этапа сушки (этап 1), имеющего сокращенное время пребывания на указанном первом этапе сушки (этап 1), выполнение второго этапа карбонизации (этап 2) в конце указанного первого этапа сушки (этап 1), и повторение первого этапа сушки (этап 1) и второго этапа карбонизации (этап 2) более одного раза.

В одном варианте реализации изобретение относится к способу отверждения материалов, упрочняемых в результате реакции с  $\text{CO}_2$ , и не упрочняемых при наличии одной только воды, включающему удаление остаточной влаги из изделия как часть какого-либо из второго этапа карбонизации (этап 2). В некоторых вариантах реализации удаление остаточной влаги из изделия включает какой-либо из первого этапа сушки (этап 1).

Ожидается, что в различных вариантах реализации системы и способы согласно изобретению обеспечат следующие свойства и возможности по отдельности или в комбинации.

Регулирование температуры изделия, подлежащего отверждению, с помощью каких-либо отдельных способов и аппаратных средств или их комбинации, как показано на фиг. 1D, во время какого-либо из этапов сушки (этап 1) и/или какого-либо из этапов карбонизации (этап 2).

Регулирование скорости газа, локально для изделий, а также скорости и объема циркуляции по всей системе отверждения с помощью каких-либо отдельных способов и аппаратных средств или их комбинации, как показано на фиг. 1D, во время какого-либо из этапов сушки (этап 1) и/или какого-либо из этапов карбонизации (этап 2).

Регулирование относительной влажности газа, локально для изделий, а также в циркулирующем газе по всей системе отверждения с помощью каких-либо отдельных способов и аппаратных средств или их комбинации, как показано на фиг. 1D, во время какого-либо из этапов сушки (этап 1) и/или какого-либо из этапов карбонизации (этап 2).

Способствование удалению избыточной влаги из циркулирующего газа (осушение) или увеличение содержания влаги в циркулирующем газе (увлажнение) с помощью каких-либо отдельных способов и

аппаратных средств или их комбинации, как показано на фиг. 1D, во время какого-либо из этапов сушки (этап 1) и/или какого-либо из этапов карбонизации (этап 2).

Регулирование концентрации  $\text{CO}_2$  в газе, локально для изделий, а также в циркулирующем газе по всей системе отверждения с помощью каких-либо отдельных способов и аппаратных средств или их комбинации, как показано на фиг. 1E, во время какого-либо из этапов сушки (этап 1) и/или какого-либо из этапов карбонизации (этап 2).

Способствовать удалению воды из изделий (испарение), подлежащих отверждению, путем регулирования скорости, температуры и влажности газового потока, локально для изделий.

Регулирование скорости, температуры и влажности газового потока, локально для изделий, таким образом, что во время какого-либо из этапов сушки (этап 1) и/или какого-либо из этапов карбонизации (этап 2) создается и поддерживается необходимая интенсивность испарения и последующее распределение влаги в структуре пор изделия.

Включение выходных сигналов датчика от изделия и/или системы отверждения, как показано на фиг. 1C, подлежащих анализу системой отверждения, для регулирования скорости, температуры и влажности газового потока, локально для изделий, и, следовательно, интенсивности испарения, чтобы удалять заданное количество воды и создавать или поддерживать распределение влаги в структуре пор изделия, в соответствии с указанными требованиями, во время какого-либо из этапов сушки (этап 1) и/или какого-либо из этапов карбонизации (этап 2).

Обеспечение того, что содержание воды в отдельных изделиях и однородность содержания воды в каждом отдельном изделии являются одинаковыми для всех изделий в системе отверждения.

Ограничение распределения содержания воды в отдельных изделиях для всех изделий в системе отверждения путем регулирования скорости, температуры и влажности газового потока, локально для изделий, так что создаются равномерные интенсивности испарения во всех областях камеры отверждения.

Включение выходных сигналов датчика от изделия и/или системы отверждения, как показано на фиг. 1C, подлежащих анализу системой отверждения, для регулирования скорости, температуры и влажности газового потока, локально для изделий в фиксированных зонах по всей камере, во время какого-либо из этапов сушки (этап 1) и/или этапов карбонизации (этап 2) в соответствии с состоянием изделий и системы, чтобы унифицировать уровень влагосодержания по всей камере.

Включение выходных сигналов датчика от изделия и/или системы отверждения, как показано на фиг. 1C, подлежащих анализу системой отверждения, для регулирования скорости, температуры и влажности газового потока, локально для изделий во всей камере, во время какого-либо из этапов сушки (этап 1) и/или этапов карбонизации (этап 2) в соответствии с состоянием изделий и системы.

Включение выходных сигналов датчика от изделия и/или системы отверждения, как показано на фиг. 1C, подлежащих анализу системой отверждения, для регулирования концентрации  $\text{CO}_2$  циркулирующего газа во время какого-либо из этапов сушки (этап 1) и/или этапов карбонизации (этап 2) в соответствии с состоянием изделий и системы.

Указанные и другие объекты, аспекты, признаки и преимущества изобретения станут более понятными из последующего описания и формулы изобретения.

#### **Краткое описание чертежей**

Задачи и признаки настоящего изобретения могут быть лучше поняты со ссылкой на чертежи, описанные ниже, и формулу изобретения. Чертежи необязательно выполнены в масштабе, вместо этого, как правило, обращается внимание на иллюстрирование принципов изобретения. На чертежах одинаковые номера позиций использованы для обозначения одинаковых частей на различных видах.

На фиг. 1A представлена принципиальная схема, иллюстрирующая примеры вариантов реализации усовершенствованного оборудования для отверждения, в соответствии с принципами изобретения. На фиг. 1A, необязательно, можно повторять этап I (150) и этап II (160), как показано стрелкой 180, и необязательно можно перейти от этапа I (150) к выпуску (170) изделия при необходимости;

на фиг. 1B - принципиальная схема, иллюстрирующая примеры вариантов реализации камер, используемых в усовершенствованном оборудовании для отверждения, в соответствии с принципами изобретения;

на фиг. 1C - принципиальная схема, иллюстрирующая примеры вариантов реализации датчиков, используемых в усовершенствованном оборудовании для отверждения, в соответствии с принципами изобретения;

на фиг. 1D - принципиальная схема, иллюстрирующая примеры вариантов реализации первого этапа обработки, осуществляемого с использованием усовершенствованного оборудования для отверждения, в соответствии с принципами изобретения;

на фиг. 1E - принципиальная схема, иллюстрирующая примеры вариантов реализации второго этапа обработки, осуществляемого с использованием усовершенствованного оборудования для отверждения, в соответствии с принципами изобретения;

на фиг. 1F - принципиальная схема, иллюстрирующая примеры вариантов реализации измеренных параметров, которые относятся к характеристикам камер, и примеры вариантов реализации параметров материала, измеряемых во время обработки в усовершенствованном оборудовании для отверждения, в

соответствии с принципами изобретения;

на фиг. 1G - принципиальная схема, иллюстрирующая примеры вариантов реализации компонентов управления процессом устройства, в соответствии с принципами изобретения;

на фиг. 2 - схематический график, иллюстрирующий массу отверждаемого CO<sub>2</sub> композиционного материала (CCM, CO<sub>2</sub> Composite Material), в зависимости от времени выдержки при отверждении с помощью CO<sub>2</sub>;

на фиг. 3 показана масса и поглощение CO<sub>2</sub> образцом во время отверждения, с иллюстрацией отдельного этапа 1 сушки и этапа 2 карбонизации;

на фиг. 3 представлена диаграмма, иллюстрирующая данные для примера 1 отверждения;

на фиг. 4A показана температура образца и профиль относительной влажности во время этапа I сушки в примере 2 отверждения;

на фиг. 4B - температура образца и профиль относительной влажности во время этапа II карбонизации в примере 2 отверждения;

на фиг. 4C - температура образца и профиль относительной влажности во время этапа III карбонизации в примере 2 отверждения;

на фиг. 5A представлен график, иллюстрирующий профиль отверждения системы в примере 3 отверждения;

на фиг. 5B - график, иллюстрирующий профиль отверждения системы в примере 3 отверждения;

на фиг. 5C - график, иллюстрирующий данные поверхностного сопротивления образца и профили отверждения системы для отверждения образца 3;

на фиг. 6 - график, иллюстрирующий различия в глубине реакции, расходе газа в кубических футах в минуту и количестве воды, удаленной из образцов композиционного материала, отвержденного CO<sub>2</sub>, в системах с использованием 1 вентилятора и 3 вентиляторов;

на фиг. 7 - график, показывающий данные для пропорции удаления воды в зависимости от подачи для газов, имеющих различную относительную влажность;

на фиг. 8 - график, показывающий рассчитанную зависимость температуры от времени, полученную путем деконволюции, по отдельности для сушки и для карбонизации;

фиг. 9-12 - представляет собой часть предшествующего уровня техники, описанного в патенте США № 9266147, выданном 23 февраля 2016 г., согласно фиг. 1-4 в настоящем документе;

на фиг. 9 - схема процесса реактивного гидротермального уплотнения жидкой фазы в присутствии газа (g-rHLPD, gas-assisted reactive hydrothermal liquid phase densification). A - высушенная пористая заготовка CaSiO<sub>3</sub>; B - частично увлажненная заготовка CaSiO<sub>3</sub>; C - конечное уплотненное монолитное твердое вещество. Этапы с 1 по 4 представляют процесс карбонизации-уплотнения, происходящий в отдельной поре: этап 1 - частичное увлажнение поры с CO<sub>2</sub>; этап 2 - диффузия, растворение и диссоциация CO<sub>2</sub>; этап 3 - растворение CaSiO<sub>3</sub> ионами водорода; этап 4 - осаждение твердых частиц. После завершения этапа 4 процесс происходит непрерывно, проходя через этапы 2-4, пока различные кинетические факторы не замедляют процесс (например, толстые реакционные слои CO<sub>2</sub>);

на фиг. 10 - первый пример реакций карбонизации с участием CO<sub>2</sub> в качестве газовой фазы, и жидкой воды в структуре пор;

на фиг. 11 - второй пример реакций карбонизации с участием CO<sub>2</sub> в качестве газовой фазы, и жидкой воды в структуре пор: состав кварц Carmel, 8 × 8 × 1,5 дюйма (203,2 × 203,2 × 38,1 мм), полученный вибрационным литьем, реакция при 90°C, 20 фунтов на кв. дюйм (137,9 кПа);

на фиг. 12 - третий пример реакций карбонизации с участием CO<sub>2</sub> в качестве газовой фазы, и жидкой воды в структуре пор: состав 1-2-3, размер образца 8×8×2 дюймов (203,2 × 203,2 × 50,8 мм), реакция при 90°C, 20 фунтов на кв. дюйм (137,9 кПа), примерно при 90% относительной влажности.

#### **Осуществление изобретения**

В изобретении описаны устройство, способы и системы, подходящие для отверждения материалов, для отверждения которых требуется CO<sub>2</sub>. Материалы не отверждаются при наличии одного только H<sub>2</sub>O. Материалы не отверждаются при отсутствии CO<sub>2</sub>. Материалы не потребляют воду в качестве реагента. Такие материалы описаны в патентных документах, которые включены в настоящий документ посредством ссылки.

В изобретении предложена система отверждения для отверждения материала, который требует CO<sub>2</sub> в качестве отверждающего реагента. Система отверждения содержит камеру отверждения, выполненную с возможностью содержания материала, который потребляет CO<sub>2</sub> в качестве реагирующего вещества (или реагента), и который не отверждается при отсутствии CO<sub>2</sub>. Камера отверждения имеет по меньшей мере одно отверстие, выполненное с возможностью обеспечения введения материала в камеру отверждения и удаления из нее, и имеет по меньшей мере одну крышку для отверстия, причем крышка выполнена с возможностью обеспечения атмосферного уплотнения при закрывании, чтобы предотвратить (или ограничить до безвредного уровня) загрязнение газа, находящегося в камере отверждения, газом, находящимся вне камеры отверждения; источник диоксида углерода, выполненный с возможностью подачи газообразного диоксида углерода в камеру отверждения через входное отверстие для газа в камеру от-

верждения, причем источник диоксида углерода имеет по меньшей мере одно устройство регулирования потока, выполненное с возможностью управления подачей газообразного диоксида углерода в камеру отверждения; подсистему циркуляции газа, выполненную с возможностью обеспечения циркуляции газа через камеру отверждения в течение периода времени, когда материал, потребляющий  $\text{CO}_2$  в качестве реагента, отверждается; подсистему регулирования температуры, выполненную с возможностью регулирования температуры газа внутри камеры; подсистему регулирования влажности, выполненную с возможностью регулирования влажности газа в камере, для увеличения или уменьшения влажности; и по меньшей мере один контроллер, связанный по меньшей мере с одним из следующего: источником диоксида углерода, подсистемой циркуляции газа, подсистемой регулирования температуры и подсистемой регулирования влажности; причем по меньшей мере один контроллер выполнен с возможностью независимого регулирования, в течение периода времени, во время которого материал, потребляющий  $\text{CO}_2$  в качестве реагента, отверждается, по меньшей мере соответствующего одного из следующего: подачи газообразного диоксида углерода, циркуляции газа через камеру отверждения, температуры газа и влажности газа.

Изобретение включает подтверждение того, что подпроцесс сушки и подпроцесс карбонизации при отверждении  $\text{CO}_2$  композиционного материала непосредственно связаны друг с другом, так что скорость и степень карбонизации можно регулировать путем управления скоростью сушки.

Описания камер отверждения и их работы, которые приведены в патенте США № 9211027, заявке на патент США № 14/602313 и заявке на патент США № 14/818629, полностью включены в настоящий документ в качестве ссылки.

Абсолютное давление процесса отверждения, выполняемого в указанной камере, составляет менее 5 атм, чтобы избежать использования сложных компонентов с повышенным давлением. Предпочтительно процесс протекает при абсолютном давлении 0,68-1,36 атм (10-20 фунтов на кв. дюйм). Более предпочтительно процесс протекает при абсолютном давлении 0,98-1,02 атм (14,5-14,9 фунтов на кв. дюйм).

В некоторых вариантах реализации изобретения части процесса могут протекать при давлении ниже атмосферного, чтобы облегчить испарение воды из изделий, подлежащих отверждению.

В изобретении предусмотрен способ, который максимизирует скорость карбонизации композиционного материала путем регулирования скорости сушки этого материала. Процесс может включать продолжительность карбонизации, которая составляет от 0 до 1000 ч. Процесс может включать отверждаемый  $\text{CO}_2$  композиционный материал, который имеет проницаемость в диапазоне от 0 до 100%. В некоторых вариантах реализации проницаемость в диапазоне от 0 до 100% может иметь верхнюю границу или нижнюю границу, соответствующую одному из 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90 или 95%.

Способ может включать в себя отверждаемый  $\text{CO}_2$  композиционный материал, который имеет глубину карбонизации ССМ в диапазоне от 0 до 36 дюймов (0-914,4 мм). Процесс может включать отверждаемый  $\text{CO}_2$  композиционный материал, в котором количество воды, удаленной из ССМ, составляет от 0 до 99 мас.% ССМ. В некоторых вариантах реализации количество удаленной воды находится в диапазоне 10-90, 15-90, 20-90, 25-90, 30-90, 35-90, 40-90, 45-90 или 50-90 мас.% ССМ.

В некоторых вариантах реализации количество удаленной воды находится в диапазоне 10-85, 15-85, 20-85, 25-85, 30-85, 35-85, 40-85, 45-85 или 50-85 мас.% ССМ.

В некоторых вариантах реализации количество удаленной воды находится в диапазоне 10-80, 15-80, 20-80, 25-80, 30-80, 35-80, 40-80, 45-80 или 50-80 мас.% ССМ.

В некоторых вариантах реализации количество удаленной воды находится в диапазоне 10-75, 15-75, 20-75, 25-75, 30-75, 35-75, 40-75, 45-75 или 50-75 мас.% ССМ.

В некоторых вариантах реализации количество удаленной воды находится в диапазоне 10-70, 15-70, 20-70, 25-70, 30-70, 35-70, 40-70, 45-70 или 50-70 мас.% ССМ.

В некоторых вариантах реализации количество удаленной воды находится в диапазоне 10-65, 15-65, 20-65, 25-65, 30-65, 35-65, 40-65, 45-65 или 50-65 мас.% ССМ.

Процесс отверждения для карбонизируемых бетонов из силиката кальция определяется как процесс, в котором бетонные изделия производят с использованием карбонизируемых цементов из силиката кальция и подвергают воздействию  $\text{CO}_2$  в контролируемом режиме, чтобы получить отвержденную бетонную деталь с необходимыми физическими и/или химическими свойствами.

Бетонные изделия, содержащие карбонизируемые цементы на основе силиката кальция в качестве их основного цементирующего связующего, затвердевают в процессе реакции. Мониторинг массы и потребления  $\text{CO}_2$  массивом бетона во время процесса отверждения выявляет два характерных этапа в процессе отверждения. Это показано на фиг. 2. Первый этап представляет собой этап сушки, на котором имеет место минимальное потребление или полное отсутствие потребления  $\text{CO}_2$ , но масса изделия уменьшается по мере испарения воды из изделия в атмосферу камеры. Второй этап представляет собой этап карбонизации, на котором интенсивность потребления  $\text{CO}_2$  увеличивается, а прирост массы вследствие карбонизации превышает потерю массы при сушке. Интенсивность потребления  $\text{CO}_2$  и последующий прирост массы твердого вещества уменьшается, когда процесс реакции карбонизации приближается к своему максимальному выходу для конкретного изделия и условий, используемых в процессе отвер-

ждения. Таким образом, процесс отверждения состоит из двух отдельных этапов, этапа сушки (этап 1) и этапа карбонизации (этап 2). В частности, вертикальная ось помечена как масса. Единицы, используемые для обозначения массы для массы образца, которая содержит воду, а также твердые вещества в образце (обозначена сплошной кривой) и накопленную массу  $\text{CO}_2$  (обозначена пунктирной кривой), могут иметь разные масштабы. То есть добавление  $\text{CO}_2$  к отверждаемому материалу в целом представляет собой значительно меньшую абсолютную массу, чем масса отверждаемого материала, поскольку молекулярный вес  $\text{CO}_2$  составляет примерно 44 атомных единицы, тогда как большинство твердых веществ содержит ряд химических элементов, таких как Ca, Mg и Si, которые по отдельности имеют атомные массы приблизительно 40, 24 и 28 атомных единиц соответственно.

Объем и продолжительность этапа 1 и этапа 2 могут изменяться в зависимости от рецептуры изделия, сырьевого материала бетона, свойств компонентов цемента и связующего, плотности изделия, геометрии изделия, использования химических добавок и условий, применяемых в процессе отверждения.

В некоторых вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением электрических свойств изделия на поверхности или в объеме. В некоторых вариантах реализации одно или множество электрических свойств, таких как удельное сопротивление, проводимость, полное сопротивление, емкость, диэлектрическая постоянная, диэлектрическая прочность, диэлектрическая проницаемость, пьезоэлектрическая постоянная, коэффициент термоэдс изделия, могут изменяться.

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением количества удаляемой из изделия воды. В некоторых вариантах реализации количество воды, удаленной из изделия, измеряют путем отслеживания изменения массы изделия в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением пропорции воды, удаляемой из изделия. В некоторых вариантах реализации пропорцию, с которой воду извлекают из изделия, измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением пропорции воды, аккумулируемой из газа, циркулирующего в камере. В некоторых вариантах реализации пропорцию воды, с которой вода аккумулируется из газа, циркулирующего в камере, измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением концентрации  $\text{CO}_2$  и/или  $\text{O}_2$  в газе, циркулирующем в камере. В некоторых вариантах реализации концентрацию  $\text{CO}_2$  и/или  $\text{O}_2$  в газе, циркулирующем в камере, измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением относительной влажности газа, циркулирующего в камере. В некоторых вариантах реализации относительную влажность газа, циркулирующего в камере, измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением температуры газа, циркулирующего в камере. В некоторых вариантах реализации температуру газа, циркулирующего в камере, измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением температуры газа, циркулирующего в камере. В некоторых вариантах реализации температуру газа, циркулирующего в камере, измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением температуры изделия. В некоторых вариантах реализации температуру изделия измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2). В некоторых вариантах реализации изменение температуры изделия контролируют с помощью инфракрасной камеры.

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением давления внутри камеры. В некоторых вариантах реализации давление внутри камеры измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов отверждения (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением уровня pH изделия. В некоторых вариантах реализации уровень pH изделия измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением уровня pH воды, аккумулируемой в течение процесса из изделий и, впоследствии, из камеры. В некоторых вариантах реализации уровень pH воды, аккумулируемой в течение процесса из изделий и, впоследствии, из камеры, измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением элементного состава изделия. В некоторых вариантах реализации элементный состав изделия измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В некоторых других вариантах реализации переход от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) связан с изменением уровня реакции изделия на ультразвуковое стимулирование. В некоторых вариантах реализации реакцию изделия на ультразвуковое стимулирование измеряют, отслеживают и регулируют в течение процесса на каком-либо из первых этапов сушки (этап 1) или на каком-либо из вторых этапов карбонизации (этап 2).

В одном аспекте регулированием температуры изделия и удалением воды на первом этапе сушки (этап 1) и скоростью реакции на втором этапе карбонизации (этап 2) управляют, а в некоторых случаях их ускоряют, посредством выбора источника энергии.

В некоторых вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой сжигание ископаемого топлива.

В некоторых вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой нагрев за счет электрического сопротивления.

В некоторых вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой инфракрасный источник тепла.

В некоторых других вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой лазер.

В некоторых вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой диэлектрический нагрев, причем в диэлектрическом нагреве может применяться использование волн микроволновой частоты или радиочастоты. В некоторых вариантах реализации используемые радиочастоты находятся в промышленном, научном и медицинском диапазоне (диапазон ISM).

В некоторых других вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой плазму.

В некоторых других вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой пар.

В некоторых других вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой перегретый пар.

В некоторых других вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой проводимость.

В некоторых вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой излучатель.

В некоторых вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой источник лучистого нагрева.

В некоторых вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, представляет собой источник нагрева, например, установку когенерации.

В некоторых вариантах реализации источник энергии, используемой для нагревания газа и/или изделия, включает комбинацию источников нагрева, описанных выше.

В одном аспекте регулированием удаления воды на первом этапе сушки (этап 1) и скоростью реакции на втором этапе карбонизации (этап 2) управляют, а в некоторых случаях их ускоряют, посредством управления извлечением воды из изделия, а впоследствии из газа в камере.

В некоторых вариантах реализации извлечение воды из изделия, а впоследствии из камеры, регулируют посредством естественной конвекции.

В некоторых вариантах реализации извлечение воды из изделия, а впоследствии из камеры, регулируют посредством принудительной конвекции.

В некоторых вариантах реализации извлечение воды из изделия, а впоследствии из камеры, регулируют посредством компрессора.

В некоторых вариантах реализации извлечение воды из изделия, а впоследствии из камеры, регулируют посредством осушителя.

В некоторых вариантах реализации извлечение воды из изделия, а впоследствии из камеры, регулируют посредством теплообменника/охладителя.

В некоторых вариантах реализации извлечение воды из изделия и впоследствии из камеры, регулируют посредством использования режимов более низкого, чем атмосферное, давления, включая, но не ограничиваясь этим, вакуум.

В некоторых других вариантах реализации извлечение воды из изделия, а впоследствии из камеры, регулируют посредством использования комбинации способов, описанных выше.

В одном аспекте регулированием удаления воды на первом этапе сушки (этап 1) и скоростью реакции на втором этапе карбонизации (этап 2) управляют, а в некоторых случаях их ускоряют, посредством управления циркуляцией газа в камере. В некоторых вариантах реализации скоростью газа, локально для изделий, управляют путем регулирования потока газа в камере.

В некоторых вариантах реализации поток газа регулируют с использованием специальной системы нагнетательной вентиляции.

В некоторых вариантах реализации поток газа и скорость газа над изделиями регулируют с использованием внутренней системы циркуляции. В некоторых вариантах реализации специальная внутренняя циркуляция внутри камеры содержит вентиляторы, которые перемещают газ внутри камеры.

В некоторых вариантах реализации поток газа регулируют с использованием внешней системы циркуляции. В некоторых вариантах реализации специальная внешняя система циркуляции содержит вентиляторы, которые перемещают газ между внутренней и наружной частью камеры.

В некоторых вариантах реализации поток газа регулируют с использованием внутренней системы циркуляции и внешней системы циркуляции в тандеме. В некоторых вариантах реализации поток газа распределяется между внутренней системой циркуляции и внешней системой циркуляции посредством обходного контура.

В некоторых вариантах реализации система отверждения содержит множество внутренних систем циркуляции, внешних систем циркуляции, нагревателей и систем осушения, которые могут быть закреплены на одной камере, обеспечивая несколько независимых зон управления внутри камеры.

В одном аспекте эффективность потребления  $\text{CO}_2$  во время процесса отверждения максимизируется путем регулирования концентрации  $\text{CO}_2$  в конце этапа карбонизации (этап 2) и/или конечного этапа сушки. Более конкретно, может допускаться уменьшение концентрации  $\text{CO}_2$  в камере во время этапов карбонизации, когда интенсивность поглощения  $\text{CO}_2$  изделием уменьшается. Это способствует сохранению  $\text{CO}_2$ , что важно как с точки зрения затрат, так и с точки зрения охраны окружающей среды.

#### Пример 1.

Способ отверждения с использованием чередующихся циклов увеличения и уменьшения скорости испарения использовали для достижения сопоставимой прочности бетонных плиток для мощения из карбонизируемого цемента на основе силиката кальция за более короткое время, чем при работе, основанной на строго постоянных условиях сушки.

#### Способы.

Камеру отверждения загружали бетонными плитками для мощения из карбонизируемого цемента на основе силиката кальция. Предыдущие измерения показали распределение относительных интенсивностей испарения по всей камере. Датчики электрического сопротивления были размещены на поверхностях изделий в местах, о которых известно, что они имеют относительно высокие и относительно низкие интенсивности испарения.

Процесс отверждения начинался с введения  $\text{CO}_2$  в камеру и систему кондиционирования газа до достижения высокой концентрации. Затем поток, тепло и осушение системы были отрегулированы для достижения необходимой температуры и относительной влажности. Камера достигла температуры  $60^\circ\text{C}$  за 2,5 ч и относительная влажность поддерживалась на уровне 60% или ниже.

При отметке 2,5 ч интенсивность испарения в камере уменьшали. Понижение условий сушки было достигнуто путем остановки нагревателя и остановки системы циркуляции газа. Указанные условия пониженной интенсивности испарения поддерживали в течение 30 мин, после чего были восстановлены стандартные условия сушки путем повторного запуска нагревателя и системы циркуляции газа. Исходные условия испарения затем поддерживали в течение 1 ч перед началом другого цикла понижения условий сушки. Точные сроки переходов между режимами нормального испарения и пониженного испарения определяли путем мониторинга электрического сопротивления поверхностей изделия. Были выполнены в общей сложности четыре цикла, прежде чем система вступила в этап интенсивной сушки при  $65^\circ\text{C}$ , при высоком расходе/скорости газа и очень низкой относительной влажности. Общая продолжительность процесса отверждения составила 13 ч.

Используемый процесс отверждения был разработан, чтобы помочь унификации уровней удаления влаги по всему изделию в камере. При уменьшении скорости внутренней циркуляции интенсивность испарения на поверхности изделий уменьшается. Это обеспечивает возможность перемещения воды изнутри изделия в наружную часть изделия, тем самым уменьшая градиент влажности внутри каждого изделия. Благодаря внедрению таких процессов приостановки, некоторые изделия, которые могли бы обра-

зывать неблагоприятный крутой градиент влажности во время этапа 1 сушки из-за относительно высоких локальных интенсивностей испарения, вместо этого могут быть высушены таким образом, что к концу этапа 1 сушки создается благоприятный пологий градиент влажности.

Экспериментальные данные показаны на фиг. 3.

Пример 2.

Бетонные цилиндры из карбонизируемого цемента на основе силиката кальция изготавливали для исследования процесса отверждения, включающего этап 1 сушки при отсутствии  $\text{CO}_2$ . Пропорции смеси, используемой для получения свежего бетона, показаны в табл. 1. Свойства свежего бетона, полученного с использованием материалов согласно количествам в табл.1, показаны в табл.2.

Таблица 1. Пропорции смеси бетона, полученного для примера 2

Компонент	Масса	Объем партии, кг	кг/м <sup>3</sup> или л/м <sup>3</sup>
Карбонизируемый цемент на основе силиката кальция	17,3%	13,90	415,4
Строит. песок	38,1%	31,91	915,8
Заполнители 1/4 дюйма (6,35 мм)	24,3%	19,48	582,3
Заполнители 3/8 дюйма (9,525 мм)	20,3%	16,21	484,5
Водоредуцирующая добавка	5	0,073	2,07
Замедляющая схватывание добавка	7	0,0973	2,90
Вода	5,50 %	4,68	139,5

Таблица 2. Свойства свежего бетона, полученного для примера 2

Параметр	Значение
Усадка, мм (дюймов)	38,1 (1,5)
Содержание воздуха, %	5,0
Удельная масса, кг/м <sup>3</sup> (фунт/куб. фут)	2374,26 (148,22)

Процедура смешивания, используемая для получения бетона, была такой, как указано ниже.

- 1) Добавляли все крупные заполнители в смеситель.
- 2) Добавляли весь песок в смеситель для получения смеси сухого заполнителя.
- 3) Смешивали сухую смесь в течение 30 с.
- 4) Добавляли 50% воды для смешивания для получения влажной смеси заполнителя.
- 5) Добавляли цемент в смеситель для получения влажной бетонной смеси.
- 6) Добавляли в смеситель замедляющие схватывание добавки, такие как, помимо прочего, Sika Plaster, и перемешивали в течение 30 с.
- 7) Добавляли оставшиеся 50% воды для перемешивания и перемешивали в течение 30 с.
- 8) Добавляли водоредуцирующую добавку, такую как, помимо прочего, Glenium 7500, и перемешивали в течение 3 мин.
- 9) Приостанавливали смеситель в течение 1 мин.
- 10) Измеряли усадку свежего бетона.
- 11) Измеряли удельную массу и содержание воздуха в свежем бетоне.
- 12) Цилиндры 164 × 8 дюймов (4166 × 203,2 мм) отливали из свежей бетонной смеси в 2-3 слоя с вибрированием каждого слоя в течение 30 с.
- 13) Выдерживали образцы бетона в печи с температурой, установленной на 80°C, в течение 3 ч (фиг. 4А).
- 14) Извлекали образцы из печи после 3 ч сушки в печи и охлаждали в условиях окружающей среды в течение 1 ч.
- 15) Взвешивали образцы, чтобы рассчитать количество влаги, потерянной во время сушки (этап 1).
- 16) Извлекали образцы из формы и выдерживали их в камере отверждения для карбонизации (этап 2) при 60°C и относительной влажности 60% в течение 20 ч при концентрации газа  $\text{CO}_2$  более 95%. (фиг. 4В).
- 17) Образцы подвергали дальнейшей карбонизации (продолжение этапа 2) при 80°C и относительной влажности 30% в течение 20 ч при концентрации газа  $\text{CO}_2$  более 95% (фиг. 4С).

Средняя прочность на сжатие для отвержденных бетонов (цилиндры 4 × 8 дюймов (101,6 × 203,2 мм)) после 40 ч карбонизации составила 9388 фунтов на квадратный дюйм (64,73 МПа).

Пример 3.

Пропорции смеси, использованной для получения бетонного изделия влажной отливки для примера 3, показаны в табл. 3. Бетон подготавливали путем смешивания сухого цемента и заполнителей, затем вводили воду и заполнители и, наконец, всю партию смешивали влажным способом. Свежий бетон проверяли на расплывание, удельный вес, содержание воздуха и тенденцию к расслоению. Свежая смесь имела удельную массу 144 фунт/фут<sup>3</sup>, (2307 кг/м<sup>3</sup>) содержание воздуха 7% и расплывание 20 дюймов (508 мм). Смесь не расслаивалась. Бетон заливали непосредственно в полость пресс-формы из ABS-пластика (acrylonitrile-butadiene-styrene, акрилонитрилбутадиенстирольный) размером 24 × 24 × 1,5 дюйма (609,6 × 609,6 × 38,1 мм), 24 × 18 × 1,5 дюйма (609,6 × 457,2 × 38,1 мм) и 24 × 12 × 1,5 дюйма (609,6 × 304,8 × 38,1 мм) и быстро уплотняли путем легкого постукивания по форме.

Таблица 3. Пропорции смеси бетона, полученного для примера 3

Компонент	Пропорции (фунт/фут <sup>3</sup> )
Карбонируемый цемент на основе силиката кальция	645 фунт/фут <sup>3</sup> (10 332 кг/м <sup>3</sup> )
Шлак	270 фунт/фут <sup>3</sup> (4235 кг/м <sup>3</sup> )
1/4 дюйма (-) базальтовый щебень	1647 фунт/фут <sup>3</sup> (26 382 кг/м <sup>3</sup> )
Пустынный (среднезернистый) песок для бетонной смеси	1007 фунт/фут <sup>3</sup> (16 131 кг/м <sup>3</sup> )
Вода	321 фунт/фут <sup>3</sup> (5142 кг/м <sup>3</sup> )
Водоотталкивающая добавка	0,4 унции/фунт (25 г/кг) цементирующая
Водоредуцирующая добавка	6 унций/фунт (375 г/кг) цементирующая
Замедляющая схватывание добавка	3 унции/фунт (187,5 г/кг) цементирующая

Форму из ABS-пластика, содержащую влажный литой образец, загружали в камеру отверждения. Были исследованы два процесса отверждения. Продолжительность каждого исследованного процесса отверждения составила 14 ч.

В процессе отверждения А камеру отверждения продували до достижения высокой концентрации CO<sub>2</sub> (> 90%). Нагревателем и системой циркуляции газа управляли для достижения температуры 60°C и относительной влажности 25% или ниже. Осуществляли мониторинг электрического сопротивления поверхности изделия. Отверждение продолжалось 14 ч. Наблюдалось, что электрическое сопротивление поверхности изделия отклонялось от электрического сопротивления невыдержанного бетонного массива в течение 4 ч. Изменение электрического сопротивления поверхности изделия указывает на переход между этапом с преобладанием сушки и этапом с преобладанием карбонизации.

В процессе отверждения В режим отверждения был модифицирован таким образом, что интенсивность испарения образца была снижена во время этапа карбонизации, чтобы увеличить степень карбонизационного отверждения. Во-первых, камеру отверждения продували до достижения высокой концентрации CO<sub>2</sub> (> 90%). Нагревателем и системой циркуляции газа управляли для достижения температуры 60°C и относительной влажности 25% или ниже. Через 4 ч, как показало изменение электрического сопротивления поверхности изделия, параметры циркуляции газа были изменены, чтобы создать высокую влажность в камере и, таким образом, снизить интенсивность испарения в течение трех часов. После этой ступени с низкой интенсивностью испарения параметры системы циркуляции газа были изменены, чтобы постепенно увеличивать интенсивность испарения, поддерживая относительную влажность камеры около 50% в течение двух часов. После этого параметры системы циркуляции газа и нагревателя были изменены, чтобы повысить температуру газа до 70°C и поддерживать относительную влажность камеры около 25% в течение оставшейся части цикла.

Температура камеры, относительная влажность камеры и электрическое сопротивление поверхности образца для процесса отверждения А и процесса В проиллюстрированы на фиг. 5С.

Измеряли прочность на изгиб изделий, отвержденных в ходе процесса А и процесса В. Изделия также разрезали пополам, чтобы определить, равномерно ли они карбонизированы. Изделие, отвержденное с использованием процесса А, имело прочность на изгиб 620 фунтов на квадратный дюйм (4275 кПа), и было обнаружено, что оно имеет слабую, малокарбонизованную область в центре. Изделие,

отвержденное с использованием процесса В, имело прочность на изгиб 789 фунтов на квадратный дюйм (5440 кПа) и наблюдалась одинаковая прочность и карбонизация по всей своей толщине. Результат данных испытаний свидетельствует о том, что снижение интенсивности испарения во время этапа карбонизации в процессе отверждения бетона может улучшить процесс отверждения.

Радиочастотное отверждение.

Пример 4.

Несколько карбонируемых плиток для мощения из цемента на основе силиката кальция помещали на совместимую с радиочастотами панель с установленными различными датчиками температуры. Образцы загружали в радиочастотную систему и доводили до температуры 60°C в течение 5 мин, затем 70°C в течение 10 мин и затем до 90°C в течение 10 мин. Все температуры постоянно контролировали с течением времени, также проводили визуальные наблюдения. В конце 25-минутного испытания были взяты несколько образцов из разных мест для анализа влажности.

Все карбонируемые плитки для мощения из цемента на основе силиката кальция нагревали и эффективно образом высушивали. Как внутренние, так и наружные температуры составляли +/- 5°C. Расхождение между измеренным содержанием влаги от центра до верхней части на одной плитке для мощения составляло от 0,25 до 1,05%.

Пример 5.

8 карбонируемых плиток для мощения из цемента на основе силиката кальция были загружены в радиочастотную систему в 4 отдельных совместимых с радиочастотами контейнерах. CO<sub>2</sub> медленно поступал в нижний угол контейнеров и выводился наружу сверху, с противоположной стороны. Образцы доводили до 60°C с помощью радиочастот в течение приблизительно 10 мин и выдерживали в течение 1 ч перед испытанием первого образца (1300 Вт в течение 10 мин, чтобы достичь 60°C, затем приблизительно 12 Вт/плитку для мощения для поддержания 60°C). Образец извлекали и испытывали каждые полчаса, а затем возвращали в среду CO<sub>2</sub> в радиочастотной системе. В течение последнего получаса температуру образца доводили до 85°C. Общее время воздействия CO<sub>2</sub> составило 5 ч. Один образец был сломан пополам и оказался прочным и карбонизированным на всем протяжении.

Возможно отверждение плиток для мощения внутри системы отверждения на основе радиочастот, и это можно выполнить за короткий промежуток времени.

Пример 6.

В радиочастотную систему помещали 8 плиток для мощения из карбонируемого цемента на основе силиката кальция с встроенными в них датчиками температуры, и температуру доводили до 85°C.

Внутренняя температура плитки для мощения достигла 60°C за 1 мин и 85°C за 2 мин.

Пример 7.

Плитки для мощения из карбонируемого цемента на основе силиката кальция помещали в радиочастотную систему с встроенными в них датчиками температуры и доводили до 85°C за 2 мин. Образцы извлекали, измеряли содержание влаги и исследовали распределение воды. Было проведено несколько повторов этого эксперимента с небольшими изменениями в установке.

Измеренное в образцах содержание влаги показывало, что они потеряли от 30 до 50% влаги в течение двух мин воздействия радиочастотного излучения.

Пример 8.

8 карбонируемых плиток для мощения из цемента на основе силиката кальция были загружены в радиочастотную систему в 4 отдельных совместимых с радиочастотами контейнерах. Датчики температуры были встроены в образцы в каждом контейнере. CO<sub>2</sub> медленно поступал в нижний угол контейнеров и выводился наружу сверху, с противоположной стороны. Образцы доводили до 85°C приблизительно за 3 мин и 50 с и выдерживали в течение 3 ч (8 кВт в течение 3 мин 50 с, чтобы достичь 85°C, затем подавали мощность 200 Вт или 25 Вт/панель для поддержания 85°C).

Центральные части плиток для мощения были чрезвычайно прочными, в то время как поверхность и углы были несколько ослабленными. Этот результат свидетельствует о том, что дальнейшая оптимизация и развитие системы отверждения на основе радиочастот может привести к чрезвычайно малому времени отверждения.

Пример 9.

В радиочастотную систему помещали 8 плиток для мощения из карбонируемого цемента на основе силиката кальция с встроенными в 2 из них датчиками температуры, и температуру доводили до 85°C в течение 2 мин. Образцы извлекали, половина из них была опрыскана водой для повторного увлажнения поверхности, а половину не опрыскивали. Два набора из 4 образцов затем помещали в пластиковые контейнеры с нагретым CO<sub>2</sub>, медленно поступающим в нижний угол и выводимым наружу. Через 3 ч образец извлекали из каждого контейнера, разбивали пополам и осматривали, по одному дополнительно образцу извлекали из каждого контейнера и откладывали в сторону. Образцы, которые не были повторно увлажнены, оказались отвержденными в центре, но поверхность и углы были ослабленными и насыщенными пылью. Повторно увлажненные образцы имели прочную поверхность, а также оказывались отвержденными в центре.

Карбонируемые плитки для мощения из цемента на основе силиката кальция могут быть нагреты и высушены с использованием радиочастоты, а затем отверждены в среде  $\text{CO}_2$  без использования радиочастоты. Использование радиочастоты только во время первого этапа нагрева и сушки данного способа все же может значительно сократить общее время обработки. Повторное увлажнение поверхности оказалось полезным после этапа очень быстрого нагревания.

Удаление воды.

На фиг. 6 представлен график, иллюстрирующий различия в глубине реакции, расходе газа в кубических футах в минуту и количестве воды, удаленной из образцов композиционного материала, отвержденного  $\text{CO}_2$ , в системах с использованием 1 вентилятора и 3 вентиляторов. Очевидно, что глубина реакции, расход газа в кубических футах в минуту и количество воды, удаляемой из образцов композиционного материала, отвержденного  $\text{CO}_2$ , увеличивается, когда предоставляется больше возможностей для перемещения химически активного газа.

На фиг. 7 представлен график, показывающий данные для пропорции удаления воды в зависимости от подачи для газов, имеющих различную относительную влажность. Как показано на фиг. 7, использование более высокой подачи и более низкой относительной влажности способствует увеличению пропорции, с которой вода удаляется из образца. Предполагается, что реакция ССМ с  $\text{CO}_2$  происходит преимущественно на границе раздела, на которой насыщенный водой ССМ находится в контакте с газообразным  $\text{CO}_2$ , поэтому более быстрое удаление воды соотносится с более высокими интенсивностями отверждения.

На фиг. 8 представлен график, показывающий вычисленную зависимость температуры от времени по отдельности для сушки и для карбонизации, полученную путем деконволюции, как описано в заявке на патент США 14/602313, включенной в настоящий документ посредством ссылки. Фиг. 8 включает сравнение экзотермы карбонизации с эндотермой сушки, вычерченной на той же временной шкале. Фиг. 8 показывает, что сушка может использоваться для регулирования скорости и объема реакции.

Оказывается, что во время отверждения фронт сушки устанавливается и движется от наружной стороны сформированного объекта к его внутренней части. Также образуется фронт реакции, почти совпадающий с фронтом сушки. Реакция отверждения может происходить только вблизи фронта сушки/фронта реакции, потому что  $\text{CO}_2$  подается в виде газа и изначально не присутствует в воде в какой-либо значимой концентрации. Перед фронтом сушки (например, на влажной стороне фронта) в порах имеется вода, которая препятствует диффузии  $\text{CO}_2$ . Позади фронта (например, на сухой стороне фронта) поры содержат слишком мало воды, чтобы поддерживать карбонизацию, но  $\text{CO}_2$  может быстро диффундировать в область фронта, а вода может диффундировать от задней части фронта к поверхности сформированного массива. Если эти фронты быстро перемещаются через область сформированного массива, степень реакции будет ниже, чем если бы фронты двигались медленно, по сравнению с собственной скоростью химической реакции. Форма фронта сушки будет зависеть от наружной формы формируемого массива, относительных скоростей сушки через его наружные поверхности и диффузионных длин от фронта до поверхности формируемого массива.

Дополнительный материал.

Патент США № 9266147 полностью включен в настоящий документ посредством ссылки.

В текучих средах диффузионные процессы ограничивают скорость процесса, когда толщина, через которую должна происходить диффузия, больше диффузионной длины, что можно оценить путем вычисления среднеквадратичного перемещения. Например, для текучей среды без конвекции диффузия ионов при комнатной температуре и атмосферном давлении в воде составляет приблизительно 0,19 см. Существует ряд областей применения, в которых толщина материалов превышает этот масштаб длин. В этих случаях необходима механическая конвекция текучей среды любым подходящим способом, известным специалисту в данной области техники. Другой альтернативой является введение растворителя или реакционноспособных частиц в виде газообразных частиц. Когда это выполняется, диффузионная длина увеличивается до 9 см. В других вариантах реализации могут быть использованы сверхкритические условия для достижения скоростей переноса, которые находятся между жидкостями и газами.

На фиг. 9 представлена схема процесса реактивного гидротермального уплотнения жидкой фазы в присутствии газа (g-rHLPD, gas-assisted reactive hydrothermal liquid phase densification). А - высушенная пористая заготовка  $\text{CaSiO}_3$ ; В - частично увлажненная заготовка  $\text{CaSiO}_3$ ; С - конечное уплотненное монолитное твердое вещество. Этапы с 1 по 4 представляют процесс карбонизации-уплотнения, происходящий в отдельной поре: этап 1 - частичное увлажнение поры с  $\text{CO}_2$ ; этап 2 - диффузия, растворение и диссоциация  $\text{CO}_2$ ; этап 3 - растворение  $\text{CaSiO}_3$  ионами водорода; этап 4 - осаждение твердых частиц. После завершения этапа 4 процесс происходит непрерывно, проходя через этапы 2-4, пока различные кинетические факторы не замедляют процесс (например, толстые реакционные слои  $\text{CO}_2$ ).

Чтобы реакции карбонизации минерального силиката протекали быстро, концепция выполняемого в присутствии газа гидротермального жидкофазного уплотнения HLPS (hydrothermal liquid phase sealing) в присутствии газа или, иначе говоря, выполняемого в присутствии газа реактивного гидротермального жидкофазного уплотнения, rHLPD (reactive hydrothermal liquid - phase densification) (фиг. 9), g-rHLPD использует частично инфильтрированное поровое пространство для обеспечения диффузии газа и быст-

рого проникновения в пористую заготовку, и насыщение тонких пленок жидкого межфазного растворителя в порах растворенным  $\text{CO}_2$ . Образцы на основе  $\text{CO}_2$  имеют низкую растворимость в чистой воде (1,5 г/л при 25°C, 1 атм). Таким образом, значительное количество  $\text{CO}_2$  должно непрерывно подаваться и распределяться по всей пористой заготовке, чтобы обеспечить значительное преобразование карбоната. Использование диффузии в газовой фазе обеспечивает увеличение диффузионной длины в 100 раз по сравнению с диффузией растворимого  $\text{CO}_2$  за эквивалентное время в жидкой фазе. Указанное частично инфильтрированное состояние обеспечивает протекание реакции до высокой степени карбонизации в течение фиксированного периода времени. Например, в частично инфильтрированном состоянии преобразование  $47,5 \pm 2,7$  мол.%  $\text{CaSiO}_3$  в  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{SiO}_2$  может быть достигнуто примерно в течение 19 ч при температуре 90°C и давлении 2,36 атм. Если поддерживаются те же условия реакции, за исключением того, что поры полностью заполнены водой, получается существенно более низкое преобразование карбонизации,  $3,8 \pm 0,5$  мол.%.

Эта работа отличается от опубликованной работы, в которой не обращали внимания на (1) выбор концентрации воды относительно степени насыщения пор (DPS, degree of pore saturation) в пористом массиве всей пористой заготовки как до, так и во время реакции (например, в этом случае карбонизация), и (2) способ доставки воды в пористый массив. Вместо этого в предшествующем уровне техники использовалось произвольное количество остаточной воды во время подготовки пористой заготовки, не признавая важность DPS, и выполнялась последующая обработка в автоклаве, содержащем  $\text{CO}_2$  и водяной пар, без определения оптимальных способов доставки воды во время реакции, которые поддерживают значение DPS, не превышающее 100%. Регулирование концентрации воды и способ ее доставки в пористую заготовку во время низкотемпературного спекания (LTS, low temperature sintering) существенно влияет на кинетику карбонизации. Чтобы продемонстрировать это и концепцию практического применения концепций DPS для нахождения условий повышенной реакционной способности и выхода реакции (реакция с высокой долей), образцы подвергали реакции в контейнере, изготовленном из микропористого слоя Gore-Tex™. Gore-Tex™ допускает попадание частиц водяного пара в образец и из него только в насыщенной водой атмосфере, в которой активность  $\text{CO}_2$  стабилизируется при давлении 2,36 атм и температуре 90°C. Под образцом образуется лужица воды для насыщения атмосферы, и она сосуществует с водяным паром в реакции на протяжении всей реакции. Таким образом, выбранное содержание воды в пористой матрице стабилизируется уравнивающим водяным паром, и в пористой матрице не происходит испарение. Вместо этого пористая матрица перераспределяет воду в матрице гомогенно, используя капиллярный поток без потери массы. В течение 19 ч реакций [когда DPS увеличивается от 0 до 60 об.%], степень карбонизации изменяется от 31,3 мол.% до максимального уровня 49,6 мол.% сверх этого значения, причем степень карбонизации падает до 35,6 мол.% при увеличении DPS до 80 и до 3,8 мол.% при DPS 100%. Эти данные показывают, что оптимальное количество жидкой воды в порах увеличивает выход и скорость реакции, поскольку это важно для ионизации как углекислоты, так и кальция. Однако уровни растворения инфильтрата должны быть достаточно низкими, чтобы газообразный  $\text{CO}_2$  мог диффундировать в пористую матрицу за счет диффузии газа, перед растворением и диффузией в связанной в порах водной фазе на границе раздела твердой/жидкой фазы пористой матрицы. Это схематически показано на фиг. 9.

Как показано на фиг. 9, распределение частиц по размерам является монодисперсным, в то время как во многих практических случаях размер частиц является полидисперсным, и упаковка частиц может принимать разнообразные конфигурации, которые включают иерархические структуры, в которых конфигурации упаковки повторяются на каждом иерархическом уровне или изменяются на каждом уровне. Также возможно, что структура упаковки может иметь дальний порядок, ближний порядок или принимать случайный уровень порядка при каждом масштабе длины, независимо от того, является ли масштаб длины малым, средним или большим. В качестве альтернативы, ближний порядок может сохраняться только в небольшом масштабе длины и случайным образом в среднем и большом масштабах длины. Также возможно, что частицы могут упаковываться в случайном порядке масштаба в малом масштабе длины, но тогда эти области случайного порядка могут периодически распределяться в большом масштабе длины. Из этих примеров ясно, что частицы могут упаковываться во многих различных конфигурациях, и перестановки практически бесконечны. Таким образом, не ставится задача определить все возможности. Принимая во внимание, что перестановки почти бесконечны, возможно, что плотность упаковки может изменяться от небольшого значения, которое может достигать 99 об.% при упорядоченной иерархической упаковке, которая повторяется в больших, средних и малых масштабах длины. В качестве альтернативы, плотность упаковки может составлять всего лишь 0,04 об.%, когда структура упаковки является характерной для аэрогеля с фрактальной или дендритной упаковкой частиц или неорганического полимера в пористой матрице.

Учитывая, что плотность упаковки может изменяться в широких пределах, количество воды, необходимое для насыщения пор при 99 об.% упаковки, является очень небольшим количеством воды, тогда как количество, необходимое для насыщения пор при 0,04 об.%, является очень большим количеством. Таким образом, если требование состоит в том, чтобы поддерживать открытую пористость, для обеспе-

чения быстрой реакции между газовой фазой и водой, а также водой и твердой фазой, то специалисту будет понятно, что оптимальное количество воды, обеспечивающее быструю реакцию, будет отличаться для каждой системы.

Хотя полезно знать величину пористости в системе, необходимое количество воды также зависит от размеров пор, формы пор, извилистости пор и от того, являются ли какие-либо из пор закрытыми порами. Закрытые поры не будут обеспечивать реакционноспособные участки для инфильтрирующего раствора, если они не будут преобразованы в открытые поры в результате последующей реакции, которая растворяет значительные части пористой матрицы. Кроме того, в приведенном выше описании предполагается, что пористая структура является однородной. Однако, если структура пор не однородна, то оптимальная концентрация воды зависит от области гетерогенной структуры, насыщаемой водой. Следует отметить, учитывая систему, которая имеет полидисперсные поры, возможно, что инфильтрирующий раствор может полностью заполнить мелкие поры, сохраняя при этом большие поры как частично заполненные. Такая ситуация является приемлемой при условии, что открытые поры находятся в разумной близости от заполненных пор. Точная дистанция близости не может быть строго определена, потому что дистанция зависит от температуры, давления и состава газа, инфильтрирующего раствора и пористой матрицы.

Приведенное выше описание демонстрирует, что невозможно указать точное количество воды (например, растворителя), необходимое для оптимизации скорости реакции, из-за бесконечных способов, которыми может быть описана пористость. Таким образом, оптимальные концентрации воды могут составлять 1 об.% (DPS = 20%), когда плотность упаковки составляет 95% об.%, но может составлять 24 об.% (DPS=63%), когда плотность упаковки составляет 62 об.%. Вероятно, что методы прогнозирования правильной пористости будут возможны при доскональном знании пористости, распределения пор по размерам, формы пор, извилистости, доли открытых и закрытых пор в матрице и однородности различных типов или пор по всем масштабам длины для реагирующего объекта. Таким образом, важным аспектом настоящего изобретения является признание того, что оптимальная концентрация воды может фактически изменяться в очень широком диапазоне концентрации воды всякий раз, когда важно, чтобы газ переносился или диффундировал в структуру пор, растворялся и реагировал с растворителем, и впоследствии реагировал с пористой матрицей.

Еще одним важным моментом данного изобретения является признание того, что существуют различные способы распределения воды в пористой матрице, как указано в этом описании. Например, если полностью насыщенная пористая прессовка пропитана водой, сушка может быть использована для создания открытых пор. Однако поры в этой структуре имеют разные значения DPS при перемещении от наружной поверхности к внутреннему объему пористой матрицы. На наружной поверхности поры не будут содержать воды, но при перемещении внутрь структуры поры частично заполняются, а при дальнейшем движении внутрь структуры поры полностью заполняются. Эта структура явно имеет большой градиент значения DPS, и, таким образом, скорость реакции в этой структуре будет изменяться от наружной части структуры к внутренней части структуры, при условии, что структура DPS с градиентом остается статической. Однако, когда этап сушки немедленно прекращается и относительная влажность регулируется до равновесного значения, так что потеря воды из пористой матрицы прекращается, под воздействием капиллярности заполненные поры будут опустошаться, становясь частично заполненными, а частично заполненные поры будут частично заполнять пустые поры, при этом вся структура будет иметь гораздо более равномерное распределение воды. В такой ситуации неоднородная система не будет реагировать так же быстро, как однородная, потому что в однородной системе доступно больше реакционных участков вследствие доступности всех пор. Таким образом, этот пример показывает, почему распределение воды в пористой матрице одинаково важно. Таким образом, в дополнение к способу добавления компонентов раствора инфильтрата (растворителя, реакционноспособных частиц) оптимальная концентрация воды также зависит от того, поддерживается ли пористая структура как однородная или неоднородная. Таким образом, в какой-либо ситуации, когда необходимо указать оптимальную концентрацию воды, описание гомогенности важно для понимания того, почему определенная концентрация воды дает самую высокую скорость реакции, а также как воспроизвести тот же набор условий каждый раз, когда проводится реакция уплотнения. Также важно указать, что в ситуациях, когда распределение растворителя или, другими словами, воды, неравномерное, для перераспределения воды могут выполняться такие процессы, как отжиг. Для воды это лучше всего делать в условиях контролируемой влажности, так что вода не испаряется из образца. Вместо этого вода просто проходит в открытые поры, чтобы сбалансировать капиллярные силы текучей среды между различными порами в матрице.

На фиг. 10-12 показаны три примера того, как реакции карбонизации с участием  $\text{CO}_2$  в качестве газовой фазы и жидкой воды в структуре пор демонстрируют оптимальное значение DPS, чтобы максимизировать степень карбонизации данного связующего  $\text{CaSiO}_3$ .

В процессе g-tHLPD используется частично инфильтрированное поровое пространство, чтобы обеспечивать диффузию газа для быстрой инфильтрации в пористую заготовку и насыщения тонких пленок жидкого межфазного растворителя в порах растворенным  $\text{CO}_2$ . Образцы на основе  $\text{CO}_2$  имеют низкую растворимость в чистой воде (1,5 г/л при 25°C, 1 атм). Таким образом, значительное количество

CO<sub>2</sub> должно непрерывно подаваться и распределяться по всей пористой заготовке, чтобы обеспечить значительное преобразование карбоната. Использование диффузии в газовой фазе обеспечивает увеличение диффузионной длины в 100 раз по сравнению с диффузией растворимого CO<sub>2</sub> за эквивалентное время в жидкой фазе. Пористые матрицы из волластонита с объемной плотностью около 1,88 г/см<sup>3</sup> изготавливали мокрым прессованием. Благодаря частично инфильтрированной матрице реакция может протекать до высокой степени карбонизации в течение фиксированного периода времени. Например, в частично инфильтрированном состоянии преобразование 47,5 ± 2,7 мол.% CaSiO<sub>3</sub> в CaCO<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> может быть достигнуто примерно в течение 19 ч при температуре 90°C и давлении 2,36 атм. Если поддерживаются те же условия реакции, за исключением того, что поры полностью заполнены водой, получается существенно более низкое преобразование карбонизации, 3,8 ± 0,5 мол.%.

Чтобы продемонстрировать это и концепцию практического применения концепций DPS для нахождения условий повышенной реакционной способности и выхода реакции (реакция с высокой долей), образцы подвергали реакции в контейнере, изготовленном из микропористого слоя Gore-Tex™. Gore-Tex™ допускает попадание частиц водяного пара в образец и из него только в насыщенной водой атмосфере, в которой активность CO<sub>2</sub> стабилизируется при давлении 2,36 атм и температуре 90°C. Под образцом добавляется лужица воды для насыщения атмосферы, и она сосуществует с водяным паром в реакции на протяжении всей реакции. Таким образом, выбранное содержание воды в пористой матрице стабилизируется уравнивающим водяным паром, и в пористой матрице не происходит испарение. Вместо этого пористая матрица перераспределяет воду в матрице гомогенно, используя капиллярный поток без потери массы. Способом мокрого прессования изготавливали пористую матрицу, имеющую объемную плотность 1,83-1,86 г/см<sup>3</sup>. В течение 19 ч реакций, [когда DPS увеличивается от 0 до 60 об.%], степень карбонизации изменяется от 31,3 мол.% до максимального уровня 49,6 мол.% сверх этого значения, причем степень карбонизации падает до 35,6 мол.% при увеличении DPS до 80 и до 3,8 мол.% при DPS 100%. Эти данные приведены на графике на фиг. 10. Указанные данные показывают, что оптимальные количества жидкого водного растворителя при DPS 60% по объему в порах максимизируют выход реакции в течение 19 ч процесса.

На фиг. 10 представлен первый пример реакций карбонизации с участием CO<sub>2</sub> в качестве газовой фазы, и жидкой воды в структуре пор.

На фиг. 11 представлен второй пример реакций карбонизации с участием CO<sub>2</sub> в качестве газовой фазы, и жидкой воды в структуре пор: состав кварц Carmel, 8 × 8 × 1,5 дюйма (203,2 × 203,2 × 38,1 мм), полученный вибрационным литьем, реакция при 90°C, 20 фунтов на кв. дюйм (137,9 кПа).

На фиг. 12 представлен третий пример реакций карбонизации с участием CO<sub>2</sub> в качестве газовой фазы, и жидкой воды в структуре пор: состав 1-2-3, размер образца 8×8×2 дюймов (203,2 × 203,2 × 50,8 мм), реакция при 90°C, 20 фунтов на кв. дюйм (137,9 кПа), примерно при 90% относительной влажности (примерно 90% RH).

На каждом из этих графиков системы отличались друг от друга тем, что размер образца, форма, реакционноспособный волластонит, время реакции, температура реакции, относительная влажность и конструкция реактора отличались друг от друга, однако каждая система была согласована внутри себя, чтобы показать оптимальную концентрацию, при которой перенос массы и скорость реакции были оптимизированы для максимизации количества образующегося карбоната. Оптимальное значение DPS изменялось от 20 до 60 об.%. В этих случаях все пористые матрицы имеют относительную плотность около 60%. Таким образом, если пористая матрица была значимо более или менее плотной, этот диапазон значений может быть еще больше, если предположить, что размер пор и извилистость одинаковы. Если размер пор и извилистость были различными, значение могло изменяться в еще более широком диапазоне. Таким образом, ключевым шагом в оптимизации степени карбонизации и интенсивности карбонизации является признание того, что существует оптимальное значение DPS для любого данного способа доставки воды. Знание этого значения позволит определять идеальные условия для минимизации количества времени реакции, а также кристаллизовать больше связующей фазы с помощью реакции гидротермального жидкофазного спекания.

Дополнительное усовершенствование изобретения может быть выполнено, когда газообразные частицы механически переносят тепло вследствие применения градиента давления к пористой матрице. Если газ является реакционноспособным веществом, поры заполнены растворяющей текучей средой, которая может вытекать из пор, оставляя на порах пленку растворителя, которая может поглощать газообразное реакционноспособное вещество. В качестве альтернативы, частично заполненные поры обеспечивают прохождение газа через поры, когда растворитель поглощает часть газа, проходящего через него.

В предпочтительном варианте следует использовать низкие температуры и низкие давления для обеспечения возможности разработки недорогих процессов. Таким образом, способы, в которых часть растворителя удерживается в порах для облегчения диффузии газообразных реакционноспособных частиц, являются предпочтительными по сравнению с теми, в которых используют статические жидкости для реакций, требующих большей части изделия. Если газообразные предшественники недоступны, то способы, которые обеспечивают быструю механическую конвекцию инфильтрационной текучей среды

через пористую матрицу, являются жизнеспособным альтернативным способом.

Не имеющие ограничительного характера рабочие примеры.

Пример А.

Внешний перенос с помощью водяного пара.

А1. Приготовление смеси.

Одиннадцать килограммов и сто семнадцать граммов NYAD 400, 20,39 кг строительного песка, 16,76 кг заполнителя размером 1/4 дюйма (6,35 мм) и 16,76 кг заполнителя № 67 были собраны в отдельные емкости. Затем подготавливали порционную воду, предварительно смешав 4,9 кг деионизированной воды, 55 мл глениума и 8 г велановой камеди. Заполнители № 67 и 1/4 дюйма загружали в бетоносмеситель Marshall tow и на заполнитель выливали примерно 1/4 порционного водного раствора. Смеситель запускали, и он работала на полной скорости в течение 1 мин. При работающем смесителе добавляли строительный песок. Еще через 1 мин перемешивания непосредственно в смеситель во время его работы добавляли NYAD400. Смеситель работал в течение дополнительной 1 мин, а затем оставшуюся порционную воду добавляли непосредственно в смесь во время работы смесителя. Затем партию перемешивали в течение 2 мин и смеситель останавливали. Боковые поверхности смесителя очищали шпателем, чтобы удалить налипший материал. Смеситель запускали опять, и он работала на полной скорости в течение дополнительных 3 мин. Смеситель останавливали и смесь выливали в емкости по 5 галлонов (18,9 л).

А2. Отливка.

Формы размером один фут на 1 фут (304,8 мм) на 6 дюймов (152,4 мм) смазывали путем распыления состава WD-40 на тряпку и вытирали внутреннюю поверхность чистой формы донизу. Используя настольные весы, регистрировали массу формы. Смазанную форму помещали на вибростенд Vibco. Смесь извлекали из емкости с помощью мастерка, совка или вручную, и форму заполняли приблизительно на 1/4. Затем форму подвергали вибрации при 60% мощности в течение приблизительно 1 мин или до тех пор, пока смесь не сформировалась в форме. Процесс повторяли до заполнения формы до краев. Окончательную массу образцов записывали перед размещением на хранение в зоне для сушки на воздухе в течение ночи.

А3. Сушка.

Образцы сушили на воздухе в течение ночи. Через 24 ч сушки на воздухе образцы помещали в печь при 90°C. Через 24 ч при 90°C образцы извлекали из формы. Образцы опять выдерживали в печи в течение дополнительных 48 часов до полного высыхания перед реакцией.

А4. Проведение реакции.

Автоклав, используемый для отверждения (реакции) образцов, представляет собой горизонтальную установку глухого пара из нержавеющей стали с радиусом 7 и длиной 12 футов (2,13 на 3,66 м). Образцы загружали в предварительно нагретый автоклав при 90°C. После закрывания дверцы автоклава его откачивали до манометрического давления -14 фунтов на кв. дюйм (96,53 кПа) в течение 15 мин. Автоклав снова заполняли нагретым газообразным CO<sub>2</sub> и паром при 147,5°C для подачи дополнительного тепла к образцам и для учета потерь тепла, возникающих во время загрузки образца и расширения газов. Как только давление в автоклаве достигло 0 фунтов/кв. дюйм, вентилятор автоклава был запущен при частоте вращения 4900 об/мин. CO<sub>2</sub> отсекали, когда общее давление достигло 10 фунтов на кв. дюйм (68,95 кПа). Температуру автоклава устанавливали равной 90°C, и горячая вода при 95°C циркулировала в нижней части автоклава для поддержания насыщенности установки водяным паром. Системе давали уравновеситься в течение от 45 мин до 1 ч (общее давление достигало приблизительно 16 фунтов/кв. дюйм (110,3 кПа)), и затем давление в автоклаве увеличивали до 20 фунтов/кв. дюйм (137,9 кПа) путем заполнения только нагретым газообразным CO<sub>2</sub>. Образцы отверждали в течение 19 ч.

Прореагировавшие образцы высушивали в сушильной печи при 90°C до тех пор, пока не происходило дополнительное снижение массы. Объем реакции вычисляли на основе прироста массы во время реакции. Степень прохождения реакции составила 35%.

Пример В.

Внутренняя, частичная сушка.

В1. Смешивание.

Одиннадцать килограммов и сто семнадцать граммов NYAD 400, 20,39 кг строительного песка, 16,76 кг заполнителя размером 1/4 дюйма (6,35 мм) и 16,76 кг заполнителя № 67 были собраны в отдельные емкости. Затем подготавливали порционную воду путем предварительного смешивания 4,9 кг деионизированной воды, 55 мл глениума и 8 г велановой камеди № 67, и заполнитель размером 1/4 дюйма (6,35 мм), загружали в бетоносмеситель Marshalltow, и на заполнитель выливали примерно 1/4 порции водного раствора. Смеситель запускали, и он работала на полной скорости в течение 1 мин. При работающем смесителе добавляли строительный песок. Еще через 1 мин перемешивания непосредственно в смеситель во время его работы добавляли NYAD400. Смеситель работал в течение дополнительной 1 мин, а затем оставшуюся порционную воду добавляли непосредственно в смесь во время работы смесителя. Затем партию перемешивали в течение 2 мин и смеситель останавливали. Боковые поверхности смесителя очищали шпателем, чтобы удалить налипший материал. Смеситель запускали опять, и он ра-

ботала на полной скорости в течение дополнительных 3 мин. Смеситель останавливали, и смесь выливали в емкости по 5 галлонов (18,9 л).

#### В2. Отливка.

Формы размером один фут на 1 фут (304,8 мм) на 6 дюймов (152,4 мм) смазывали путем распыления состава WD-40 на тряпку и вытирали внутреннюю поверхность чистой формы донизу. Используя настольные весы, регистрировали массу формы. Смазанную форму помещали на вибростенд Vibco. Смесь извлекали из емкости с помощью мастерка, совка или вручную, и форму заполняли приблизительно на 1/4. Затем форму подвергали вибрации при 60% мощности в течение приблизительно 1 мин или до тех пор, пока смесь не сформировалась в форме. Процесс повторяли до заполнения формы до краев. Окончательную массу образцов записывали перед размещением на хранение в зоне для сушки на воздухе в течение ночи.

#### В3. Сушка.

Образцы сушили на воздухе в течение ночи. Через 24 ч сушки на воздухе образцы помещали в печь при 90°C. Через 24 ч при 90°C образцы извлекали из формы. Образцы помещали обратно в печь до тех пор, пока образцы не высохли до остаточного содержания воды 2,2 мас. %.

#### В4. Проведение реакции.

Автоклав, используемый для отверждения образцов, представляет собой горизонтальную установку глухого пара из нержавеющей стали с радиусом 7 и длиной 12 футов (2,13 на 3,66 м). Образцы загружали в предварительно нагретый автоклав при 90°C. После закрывания дверцы автоклава, автоклав снова заполняли нагретым газообразным CO<sub>2</sub> и паром при 147,5°C для подачи дополнительного тепла к образцам и для учета потерь тепла, возникающих во время загрузки образца и расширения газов. Вентилятор автоклава запускали с частотой вращения 4900 об/мин. CO<sub>2</sub> отсекали, когда общее давление достигло 10 фунтов на кв. дюйм (68,95 кПа). Температуру автоклава устанавливали равной 90°C, и горячая вода при 95°C циркулировала в нижней части автоклава для поддержания насыщенности установки водяным паром. Системе давали уравниваться в течение от 45 мин до 1 ч (общее давление достигало приблизительно 16 фунтов/кв. дюйм (110,3 кПа)), и затем давление в автоклаве увеличивали до 20 фунтов/кв. дюйм (137,9 кПа) путем заполнения только нагретым газообразным CO<sub>2</sub>. Образцы отверждали в течение 19 ч.

Прореагировавшие образцы высушивали в сушильной печи при 90°C до тех пор, пока не происходило дополнительное снижение массы. Объем реакции вычисляли на основе прироста массы во время реакции. Средний объем реакции составил 53%.

В некоторых вариантах реализации изобретения механическая конвекция включает один из потоков, поток под давлением, капиллярный электроосмотический поток, магнитоосмотический поток и поток, управляемый температурным и химическим градиентом.

В некоторых вариантах реализации изобретения монолитный керамический массив имеет степень насыщения пор примерно от 15 до 70%.

#### Определения.

Какая-либо ссылка в формуле изобретения на электронный сигнал или электромагнитный сигнал (или их эквиваленты) должна интерпретироваться таким образом, что в предпочтительном варианте реализации сигнал является непереходным электронным сигналом или непереходным электромагнитным сигналом. Если сам по себе сигнал не заявлен, ссылка в некоторых случаях может быть на описание распространяющегося или переходного электронного сигнала или электромагнитного сигнала.

#### Теоретическая дискуссия.

Хотя приведенное в настоящем документе теоретическое описание считается правильным, работа описанных и заявленных здесь устройств не зависит от точности или достоверности теоретического описания. Т.е. более поздние теоретические разработки, которые могут объяснить наблюдаемые результаты на основе, отличной от представленной теории, не будут умалять изобретения, описанные в настоящем документе.

Какой-либо патент, патентная заявка, публикация патентной заявки, журнальная статья, книга, опубликованная статья или другой общедоступный материал, указанный в описании, настоящим включен в настоящий документ посредством ссылки в полном объеме. Какой-либо материал или его часть, которые, как упомянуто, включены в настоящий документ посредством ссылки, но которые противоречат существующим определениям, заявлениям или другим материалам изобретения, явно изложенным в настоящем документе, включены только в той степени, в которой не возникает никакого конфликта между этим включенным материалом и настоящим материалом изобретения. В случае конфликта конфликт должен быть разрешен в пользу настоящего изобретения как предпочтительного.

Хотя изобретение было конкретно показано и описано со ссылкой на предпочтительный режим, показанный на чертежах, специалисту в данной области техники должно быть понятно, что могут быть выполнены различные изменения в деталях без отклонения от сущности и объема изобретения, определяемого формулой изобретения.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство для отверждения материалов, отверждаемых в результате реакции с  $\text{CO}_2$ , содержащее камеру отверждения, которая имеет по меньшей мере одно отверстие, выполненное для обеспечения введения указанного материала в указанную камеру отверждения и удаления из нее, и имеет по меньшей мере одну крышку для указанного отверстия, при этом указанная крышка выполнена с возможностью обеспечения атмосферного уплотнения при закрывании, чтобы предотвратить загрязнение газа, находящегося в указанной камере отверждения, газом, находящимся вне указанной камеры отверждения;

источник диоксида углерода или воздуха, выполненный с возможностью подачи газообразного диоксида углерода или воздуха в указанную камеру отверждения через входное отверстие для газа в указанной камере отверждения, причем указанный источник диоксида углерода или воздуха имеет по меньшей мере одно устройство регулирования потока, выполненное с возможностью управления расходом газообразного диоксида углерода или воздуха, подаваемого в указанную камеру отверждения;

подсистему циркуляции газа, выполненную с возможностью обеспечения циркуляции указанного газообразного диоксида углерода или воздуха через указанную камеру отверждения;

подсистему регулирования температуры, выполненную с возможностью регулирования температуры указанного газа внутри указанной камеры;

подсистему регулирования влажности, выполненную с возможностью регулирования влажности указанного газа внутри указанной камеры; и

по меньшей мере один контроллер, связанный по меньшей мере с одним из следующего: указанным источником диоксида углерода, указанной подсистемой циркуляции газа, указанной подсистемой регулирования температуры и указанной подсистемой регулирования влажности, причем указанный по меньшей мере один контроллер выполнен с возможностью независимого регулирования, по меньшей мере, соответствующего одного из следующего: указанного расхода газа внутри камеры, указанной циркуляции указанного газа через указанную камеру отверждения, указанной температуры указанного газа и указанной влажности указанного газа,

при этом указанный по меньшей мере один контроллер выполнен с возможностью обеспечения времени пребывания на первом этапе сушки (этап 1), причем время пребывания на первом этапе сушки подобрано так, чтобы быть минимальным,

при этом устройство для отверждения материалов выполнено с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2).

2. Устройство по п.1, выполненное с возможностью первоначального прохождения материалом первого этапа сушки (этап 1) при отсутствии преднамеренно добавленного  $\text{CO}_2$ .

3. Устройство по п.1, выполненное с возможностью первоначального прохождения материалом первого этапа сушки (этап 1) при наличии  $\text{CO}_2$ .

4. Устройство по п.1, выполненное с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) путем определения изменения одного или более электрических свойств материала на его поверхности или в его основной массе.

5. Устройство по п.4, в котором одно или более электрических свойств материала включают в себя по меньшей мере один из следующих параметров: поверхностное удельное сопротивление, объемное удельное сопротивление, электропроводность, полное сопротивление, емкость, диэлектрическая постоянная, диэлектрическая прочность, диэлектрическая проницаемость, пьезоэлектрическая постоянная и коэффициент термоэдс.

6. Устройство по п.1, выполненное с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения количества воды, которая удалена из материала.

7. Устройство по п.1, выполненное с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения по меньшей мере одного из следующего: концентрации  $\text{CO}_2$  и концентрации  $\text{O}_2$  в газе, циркулирующем в камере.

8. Устройство по п.1, выполненное с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения температуры материала.

9. Устройство по п.1, выполненное с возможностью измерения, отслеживания и регулирования давления внутри камеры на протяжении всего процесса на каком-либо из первого этапа сушки (этап 1) и второго этапа отверждения (этап 2).

10. Устройство по п.1, выполненное с возможностью определения перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу карбонизации (этап 2) посредством определения изменения уровня pH материала.

11. Устройство по п.1, в котором подсистема регулирования температуры дополнительно содержит по меньшей мере один источник энергии, выполненный с возможностью нагрева по меньшей мере одного из газа и материала.

12. Устройство по п.11, в котором источник энергии выполнен с возможностью управления временем пребывания по меньшей мере на одном из первого этапа сушки (этап 1) и второго этапа карбониза-

ции (этап 2).

13. Устройство по п.11, в котором указанный источник энергии выполнен с возможностью использования сжигания ископаемого топлива, нагрева за счет электрического сопротивления диэлектрического нагрева и/или источника лучистого нагрева.

14. Устройство по п.1, в котором подсистема регулирования влажности выполнена с возможностью регулирования извлечения воды из материала, причем выполнение подсистемы регулирования влажности с возможностью регулирования извлечения воды включает ее выполнение с возможностью регулирования извлечения воды с использованием осушителя, причем выполнение подсистемы регулирования влажности с возможностью регулирования извлечения воды также включает ее выполнение с возможностью регулирования извлечения воды с использованием одного из теплообменника и охладителя.

15. Устройство по п.1, в котором подсистема циркуляции газа выполнена с возможностью регулирования циркуляции газа в камере, чтобы регулировать удаление воды на первом этапе сушки (этап 1) и регулировать скорость реакции на втором этапе карбонизации (этап 2).

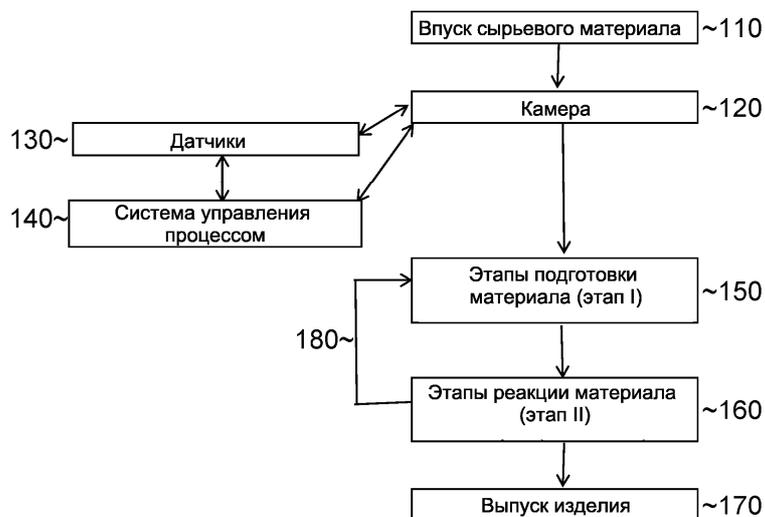
16. Устройство по п.1, в котором подсистема циркуляции газа, находящихся рядом с материалом.

17. Устройство по п.1, в котором подсистема циркуляции газа выполнена с возможностью регулирования потока и скорости газа с использованием внешней системы циркуляции.

18. Устройство по п.1, в котором устройство регулирования потока газа выполнено с возможностью изменения концентрации  $\text{CO}_2$  во время первого этапа сушки (этап 1) и второго этапа карбонизации (этап 2), чтобы максимизировать эффективность потребления  $\text{CO}_2$  во время процесса отверждения.

19. Способ отверждения материала, потребляющего  $\text{CO}_2$  в качестве реагента и не отверждающегося при отсутствии  $\text{CO}_2$  во время отверждения, при этом указанный материал не отверждается при наличии одной только воды и не потребляет воду во время отверждения, с использованием устройства по любому из пп.1-18, включающий следующие этапы:

выполнение первого этапа сушки с первым временем пребывания на указанном первом этапе сушки;  
выполнение второго этапа отверждения в конце указанного первого этапа сушки; и  
определение перехода от первого этапа сушки (этап 1) ко второму этапу отверждения (этап 2).



Фиг. 1А

Камера (Удержание CO2)	~120
------------------------	------

Содержит CO2 для целей обработки, для целей защиты, и чтобы сделать обработку экономически более эффективной.

#### Варианты реализации

жесткая оболочка
мягкая оболочка
поток через оболочку
первичное и вторичное удерживание (например, тамбур, воздушный затвор, с помощью вакуума, с помощью повышенного/пониженного давления)
воздушная завеса
предохранит. датчики (монитор концентр. CO2 и подачи предупредит. сигнала, сброса давления)
дверца/уплотнение/запорное устройство

Фиг. 1B

Датчики	~130
<b>Датчики системы</b> Обеспечивает входные параметры системы для процесса управления с замкнутым контуром, мониторинг данных в режиме реального времени и регистрацию данных.	<b>Изделие/местонахождение Датчики</b> Обеспечивает входные параметры материала для процесса управления с замкнутым контуром, мониторинг данных в режиме реального времени и регистрацию данных.
Варианты реализации	Варианты реализации
температура	температура
относительная влажность	относительная влажность
давление	давление
концентрация CO2	концентрация CO2
концентрация O2	концентрация O2
расход газа	расход газа
уровень жидкости (количество извлеченной воды)	датчик нагрузки (масса бетонной детали)
электропроводность (извлеченной воды)	электрические свойства
уровень pH (извлеченной воды)	уровень pH

<b>Датчики системы</b> Варианты реализации	<b>Изделие/местонахождение Датчики</b> Варианты реализации
уровень жидкости (количество извлеченной воды)	анализ элементного состава
	инфракрасная камера
	ультразвук

Фиг. 1C

	Этапы подготовки материала (этап I)	~150
Нагрев (источник энергии)	Извлечение воды	Циркуляция
Обеспечивает энергию для системы для способствования испарению воды из бетонной детали в процессе сушки и отверждения, и для роста кристаллов в бетонной детали во время отверждения	a) Открывает каналы в пористой бетонной детали для обеспечения инфильтрации CO <sub>2</sub> ; b) Удаляет воду из системы для способствования дополнительному испарению.	a) Способствует однородности атмосферы во всей системе; b) Способствует извлечению воды

Варианты реализации	Варианты реализации	Варианты реализации
сжигание ископаемого топлива	естественная конвекция	Внутренняя циркуляция (вентилятор внутри камеры)
электрическое сопротивление	принудительная конвекция	Внешняя циркуляция (вентилятор снаружи камеры)
инфракрасный	компрессор	Внешняя циркуляция с обходным каналом
диэлектрическая сушка включает микроволновую и радиочастоту	осушитель	Система нагнетательной вентиляции
лазер	теплообменник/охладитель	
Варианты реализации	Варианты реализации	Варианты реализации
плазма	вакуум	
перегретый пар		
пар		
проводимость		
излучатель		
излучение		
источники тепла, такие как установка для комбин. производства тепловой и электрич. энергии		

Фиг. 1D

Этапы реакции материала (этап II)	~160
<b>Подача и регулирование CO<sub>2</sub></b>	
Обеспечивает подачу CO <sub>2</sub> в камеру, поддерживает заданную концентрацию CO <sub>2</sub> во время сушки и отверждения, понижает концентрацию CO <sub>2</sub> перед завершением отверждения, как определено системой управления процессом с замкнутым контуром	

Варианты реализации
пропорциональные клапаны
системы привода с регулируемой скоростью
программируемые логические устройства управления (PLC)
контроллеры температуры
интерфейс человек-машина (HMI)
виртуальная частная сеть (VPN)
контроллер массового расхода
клапан I/P (ток/давление)
кодирующее устройство
источник CO <sub>2</sub>
входные клапаны
выходные клапаны

Фиг. 1E

Система управления процессом	~140
------------------------------	------

Принимает и использует входные параметры от датчиков системы и датчиков изделия/местоположения для достижения требуемых условий процесса для отверждения бетона в присутствии CO<sub>2</sub> под управлением с обратной связью. Дополнительно обеспечивает упреждающее управление (управление без обратной связи).

Параметры камеры

Температура на входе камеры
Температура на выходе камеры
Абсолютная влажность на входе камеры
Относительная влажность на входе камеры
Абсолютная влажность на выходе камеры
Относительная влажность на выходе камеры
Концентрация CO <sub>2</sub> в камере, %
Давление CO <sub>2</sub> в камере
Массовый расход CO <sub>2</sub> в камере
Расход газа в камере
Расход газа на осушение
Температура TCU (transmission control unit, устройство управления передачей данных)
Система управления горелкой
Конденсация H <sub>2</sub> O
Общее содержание воды
Положение дверцы

Фиг. 1F

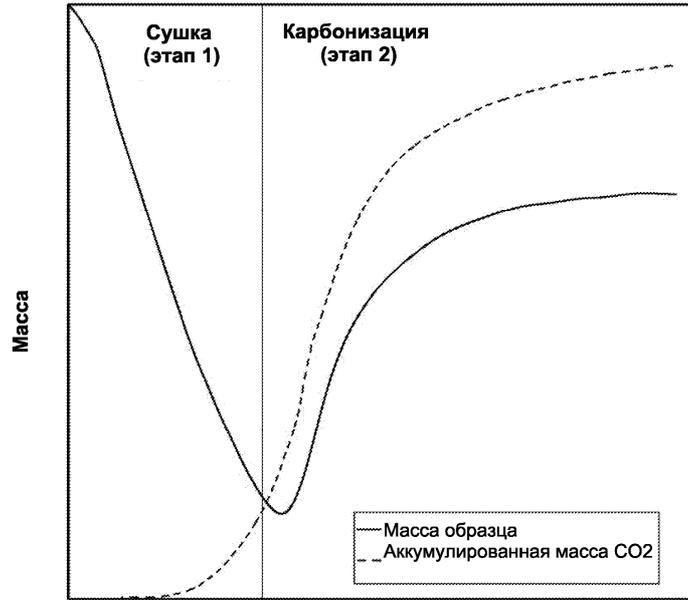
Система управления процессом	~140
------------------------------	------

Принимает и использует входные параметры от датчиков системы и датчиков изделия/местоположения для достижения требуемых условий процесса для отверждения бетона в присутствии CO<sub>2</sub> под управлением с обратной связью. Дополнительно обеспечивает упреждающее управление (управление без обратной связи).

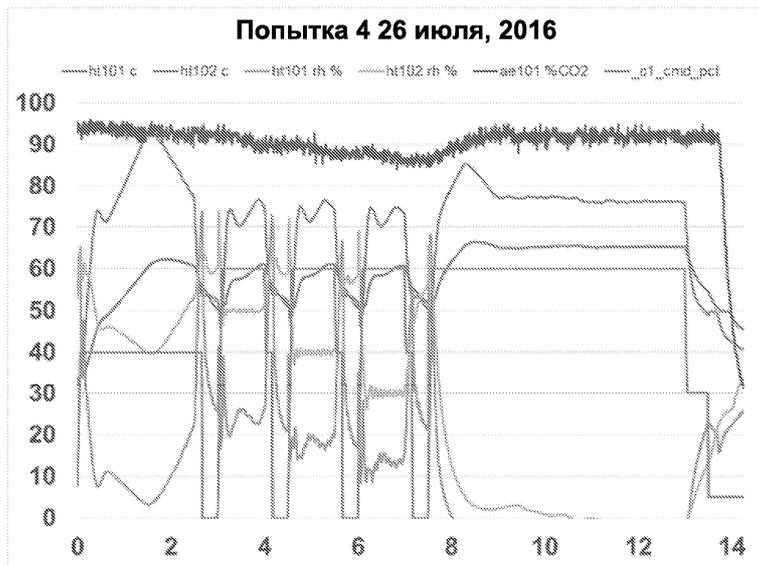
Параметры изделия/материала

Температура изделия, измеренная на поверхности и внутри, и ее распределение в процессе обработки
Влагосодержание изделия, измеренное на поверхности и внутри, и ее распределение в процессе обработки
Карбонизация изделия на поверхности, в нижней части, внутри, и ее распределение в процессе обработки
Элементный состав на поверхности, в нижней части, внутри, и его распределение в процессе обработки
Уровень pH изделия на поверхности, в нижней части, внутри, и его распределение в процессе обработки

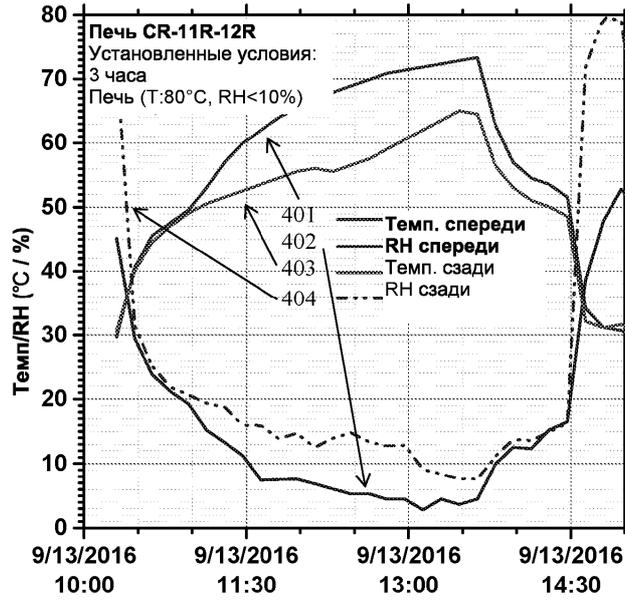
Фиг. 1G



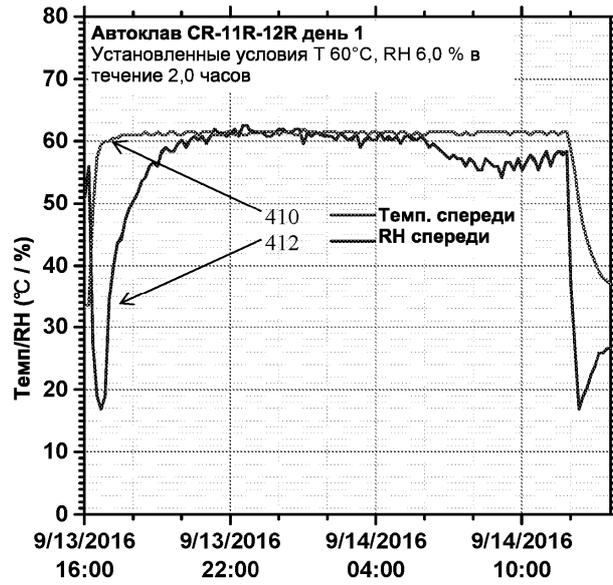
Время  
Фиг. 2



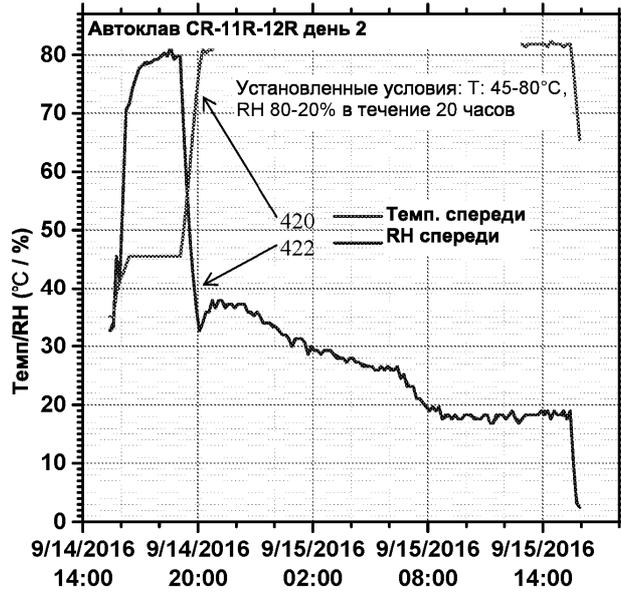
Фиг. 3



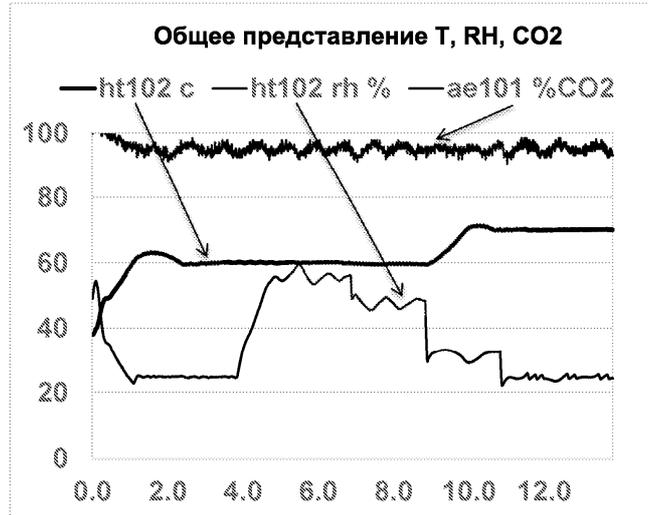
Фиг. 4А



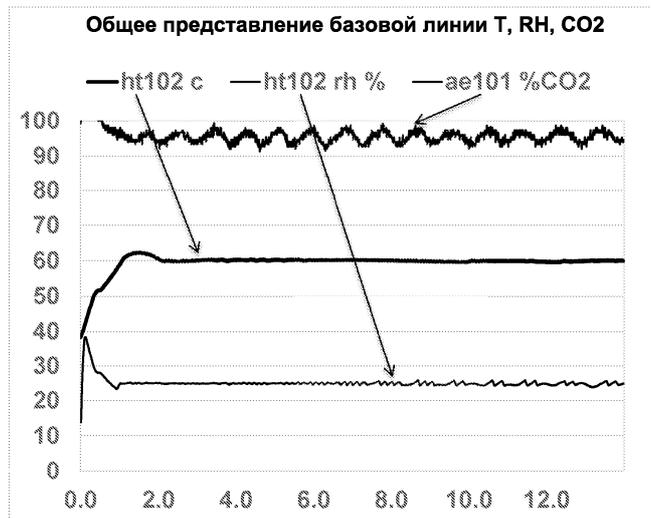
Фиг. 4В



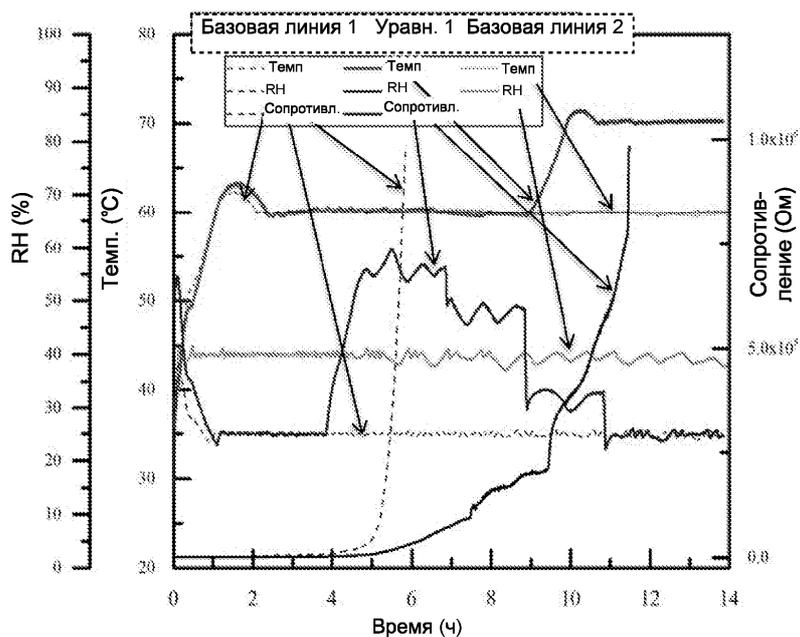
Фиг. 4С



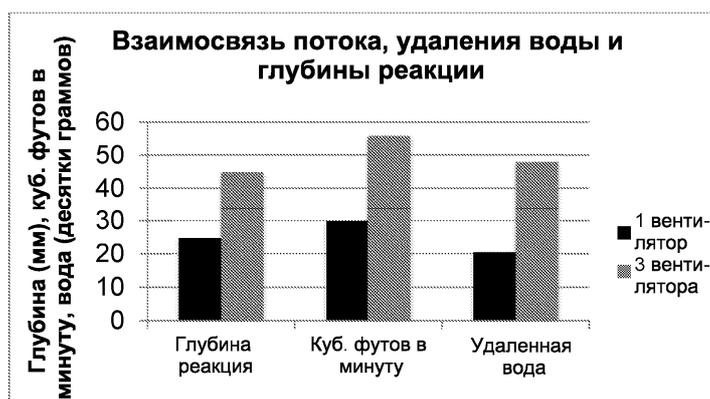
Фиг. 5А



Фиг. 5В



Фиг. 5С

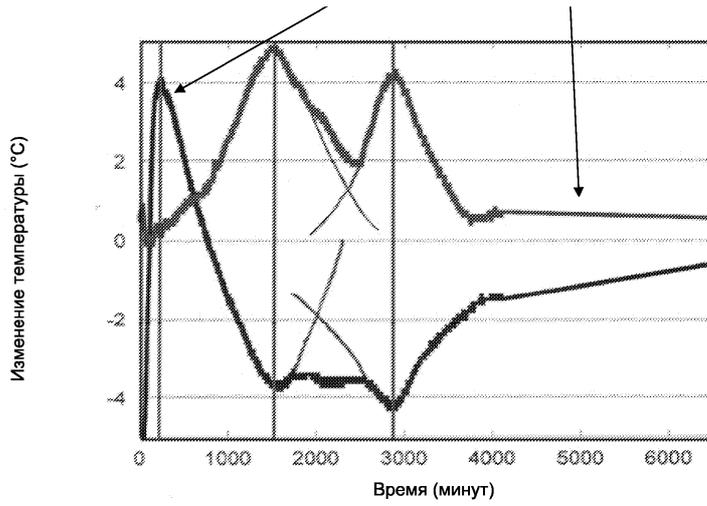


Фиг. 6

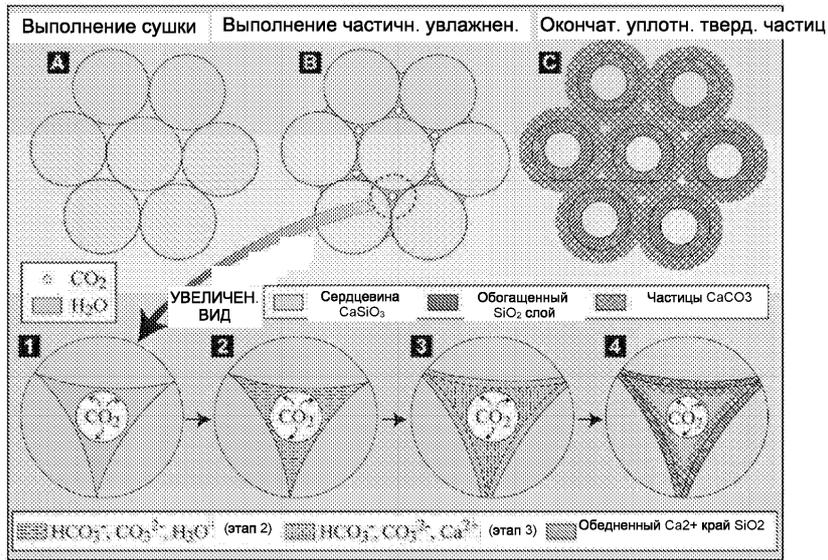


Фиг. 7

Деконволюция событий сушки и карбонизации



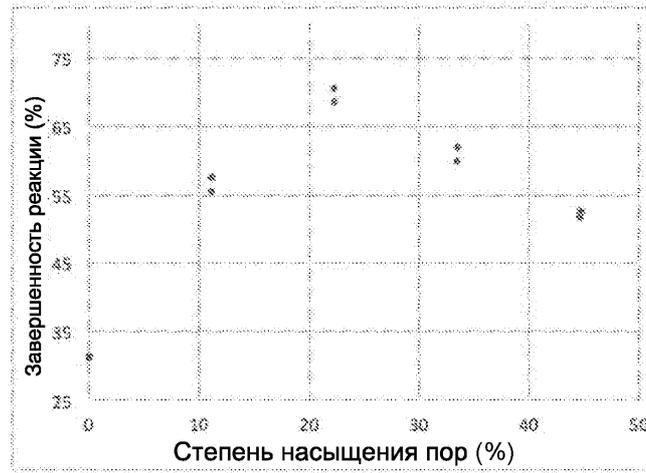
Фиг. 8



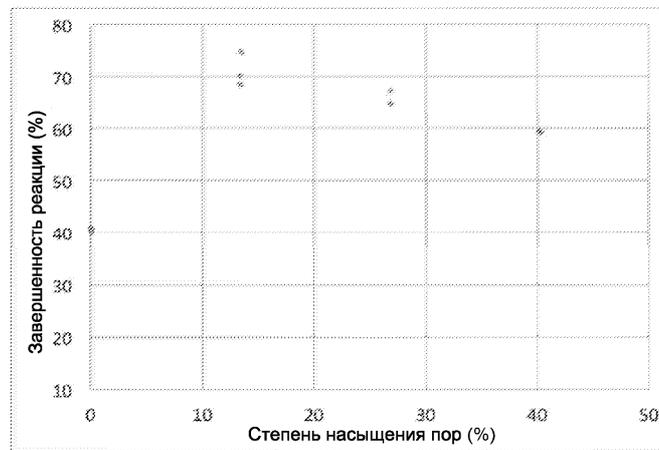
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12

