

Строительные материалы и изделия

Научная статья
УДК 691.32:620.193.2
DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-2/73-85>

С.Н. Леонович, Chao Feng, Miao Jijun, Junwei Liu, В.В. Малюк, Е.Е. Шалый,
Д.А. Литвиновский, А.В. Колодей, А.В. Степанова

ЛЕОНОВИЧ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, главный научный сотрудник Центра научных исследований и испытаний строительных конструкций, leonovichsn@tut.by

КОЛОДЕЙ АЛИНА ВЛАДИМИРОВНА – инженер кафедры «Строительные материалы и технология строительства»

Белорусский национальный технический университет

ЛИТВИНОВСКИЙ ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ – главный инженер

ООО «ИнжСпецСтройПроект»

Минск, Республика Беларусь

CHAO FENG, MIAO JIJUN, JUNWEI LIU

Университет технологии Циньдао

Циньдао, Китай

МАЛЮК ВЛАДИСЛАВ ВИКТОРОВИЧ – старший преподаватель кафедры строительства

Технический нефтегазовый институт

Сахалинский государственный университет

Южно-Сахалинск, Россия

ШАЛЫЙ ЕВГЕНИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – ведущий инженер

ООО «ПриМорПроектБюро»

Владивосток, Россия

СТЕПАНОВА АННА ВЛАДИСЛАВОВНА – старший преподаватель кафедры «Строительные технологии и конструкции»

Белорусский государственный университет транспорта

Гомель, Республика Беларусь

Поведение конструкционного бетона при высокой температуре: карбонизация, декарбонизация и рекарбонизация

Аннотация. Проанализирована мультискематическая модель процессов карбонизации, декарбонизации и рекарбонизации бетона при высоких температурах. Экспериментальная валидация интегрированной модели проводится с использованием термогравиметрических испытаний цементного камня и прочности растворных композитов сразу после высокотемпературного нагрева и после пожароотверждения. Концентрация CO_2 и влажность экспериментально изменяются в качестве термодинамических граничных условий для широкодиапазонной проверки и валидации. Прочность на сжатие рассматривается не как свойство материала, а как расчетная конструктивная характеристика цилиндрического твердого тела, где температура, степень гидратации и карбонизация развиваются неравномерно. Разработанная модель позволяет исследовать влажный, поврежденный огнем бетон как составной многомасштабный материал.

Ключевые слова: бетон, высокая температура, пожароотверждение, карбонизация, декарбонизация, модель рекарбонизации

Для цитирования: Леонович С.Н., Chao Feng, Miao Jijun, Junwei Liu, Малюк В.В., Шалый Е.Е., Литвиновский Д.А., Колодей А.В., Степанова А.В. Поведение конструкционного бетона при высокой температуре: карбонизация, декарбонизация и рекарбонизация // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 2(55). С. 73–85.

© Леонович С.Н., Chao Feng, Miao Jijun, Junwei Liu, Малюк В.В., Шалый Е.Е., Литвиновский Д.А., Колодей А.В., Степанова А.В., 2023

Статья поступила: 26.04.2023; рецензирование: 12.05.2023.

Введение

Выполнен большой объём экспериментальных исследований конструкционного бетона при высоких температурах - до 700 °С, включая прогноз на основе подходов механики разрушения. Однако очень важно моделирование процессов карбонизации, декарбонизации, рекарбонизации [18–20].

В конструкционном бетоне при воздействии огня происходят различные изменения химических и механических свойств из-за сложного сочетания термических, химических и механических явлений [9, 13]. Предложен ряд моделей [2, 4–6] для оценки работоспособности бетонных конструкций во время пожара и после него (рис. 1) путем интеграции характеристик бетона и арматурных стержней при высокой температуре в многомасштабную платформу [10, 11]. Мезомасштабное моделирование цементного композита связано с макроскопической моделью большого референтного объема, включая разнонаправленные трещины. Железобетон после воздействия огня моделируется компьютерной системой (рис. 2).

Эта модернизация многомасштабного моделирования [2, 4–6] фокусируется на карбонизации гидратов цемента в процессе и после нагрева. Учитывается карбонизация в нормальных климатических условиях, где нейтрализация является основным фактором долговечности. Исследованы глубина карбонизации нагреваемого бетона и скорость карбонизации после нагрева [8, 12]. Карбонизация способствует уплотнению микропоровой структуры бетона и увеличению его прочности. Эти противоречивые эффекты могут быть исследованы методами механики твердого тела, особенно при повышенной температуре.

Согласно анализу, в очагах возгорания концентрация углекислого газа повышается до 5%. Но есть участки, где она повышается до 15% в зависимости от пожарной ситуации. В последние годы появились исследования карбонизации во время нагрева [16]. Однако приросту прочности при карбонизации во время пожара уделяется сравнительно мало внимания. Предполагается, что увеличение прочности в связи с изменением структуры пор является неоспоримым фактом, который следует учитывать при оценке работоспособности конструкционного бетона.

Предложенные модели карбонизации и де- и рекарбонизации гидратов цемента для всех процессов нагрева проверены численно и подтверждены множеством экспериментов. Планируется её доработка с учетом условий пожара [2, 4–6], что позволит расширить их применимость и универсальность.

Карбонизация, декарбонизация и модели рекарбонизации при высокой температуре и после пожара

Предложены три модели: модель карбонизации негашеной извести (СаО) при обезвоживании гидроксида кальция (Са(ОН)₂) в условиях высокой температуры; модель декарбонизации карбоната кальция (СаСО₃) путем карбонизации гидрата силиката кальция (C-S-H), Са(ОН)₂ и СаО; модель рекарбонизации Са(ОН)₂ в ходе регидратации СаО при послепожарном отверждении. Эти модели интегрированы в многомасштабную платформу [10, 11], что обеспечивает автоматическое прогнозирование свойств бетона с такой же точностью, как и в предыдущих моделях [2, 4-6].

Базовая многомасштабная платформа [10, 11] (рис. 3 А) включает в себя модели карбонизации C-S-H и Са(ОН)₂. Её применимость была подтверждена при нормальной комнатной температуре окружающей среды [3, 7]. Эта система также позволяет вычислять миграцию углекислого газа и влаги и их термодинамическое равновесие. Поскольку процессы хемофизики негомогенны в пространстве, плотные кластеры насыщенного газом твердого тела численно генерируются вблизи поверхности конструкционного бетона. При этом модель карбонизации в окружающей среде остается неизменной, а характерные процессы при высокой температуре фокусируются на расширении сферы применения платформы (рис. 3).

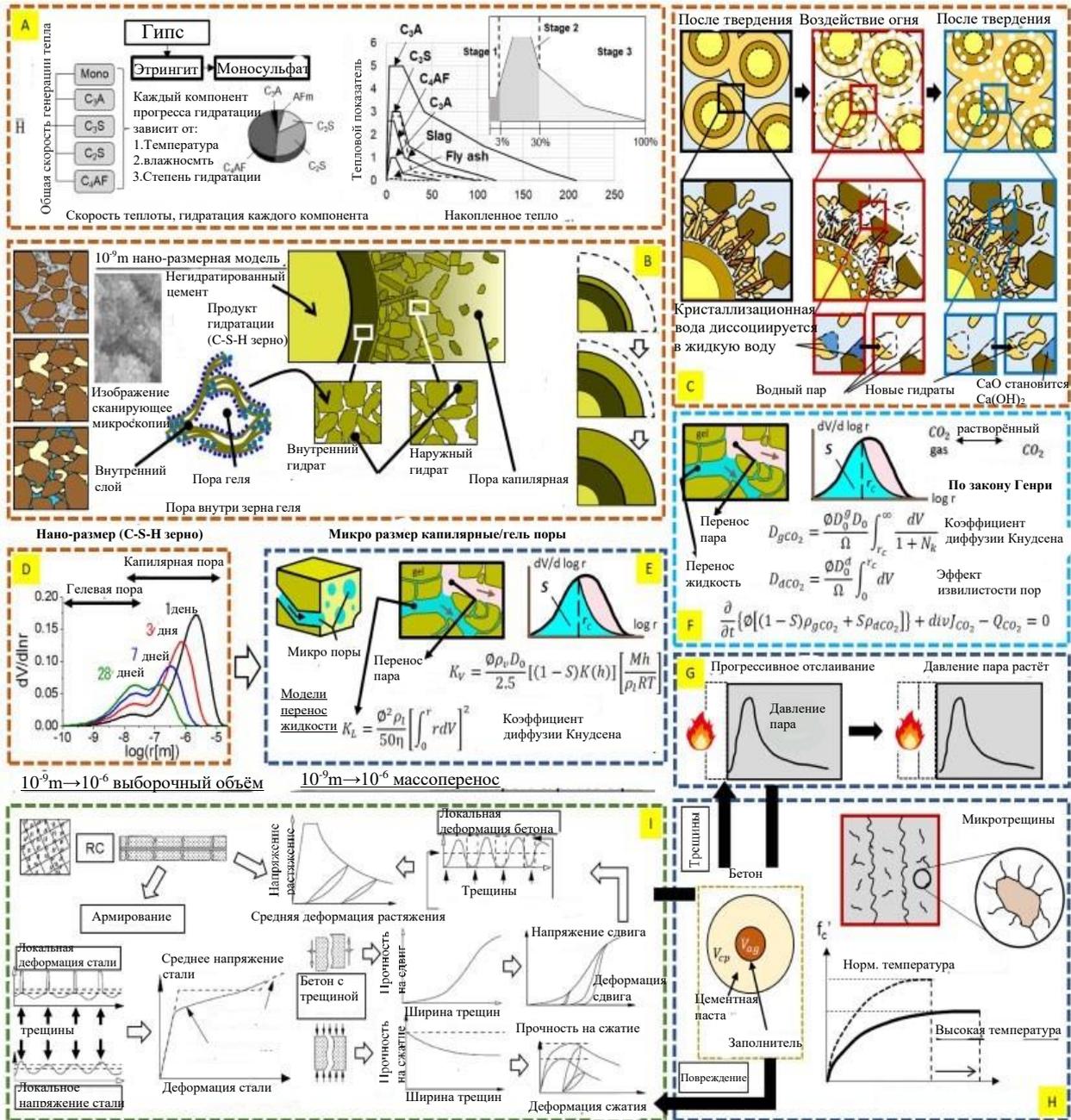


Рис. 1. Схема многомасштабного моделирования, включая модернизацию моделей в условиях пожара [2, 4-6]:

- A) многокомпонентная модель теплогидратации цемента;
- B) модель формирования затвердевшей микропористой структуры в соответствии с гидратацией и карбонизацией;
- C) модель износа и регидратации твердых тел CSH и CH с влагой и углекислым газом;
- D) стохастическая модель микропор;
- E) равновесие влажности и кинетика внутри микропор;
- F) связанная миграция и равномерная миграция поровых растворов;
- G) модель разбрызгивания и переходное граничное состояние;
- H) взаимодействие и затвердевание заполнителя и цементного вяжущего;
- I) моделирование размазанных трещин для конструктивных бетонных элементов [10, 11]

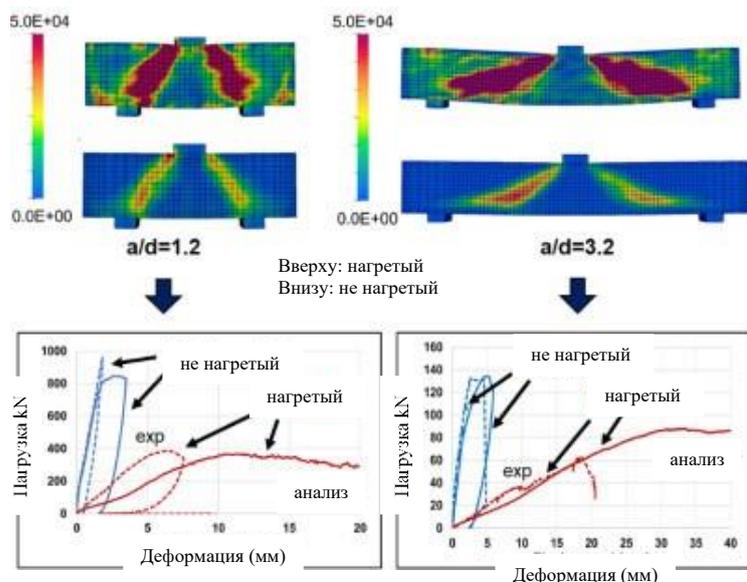


Рис. 2. Сдвиговая способность балок при воздействии огня [2]

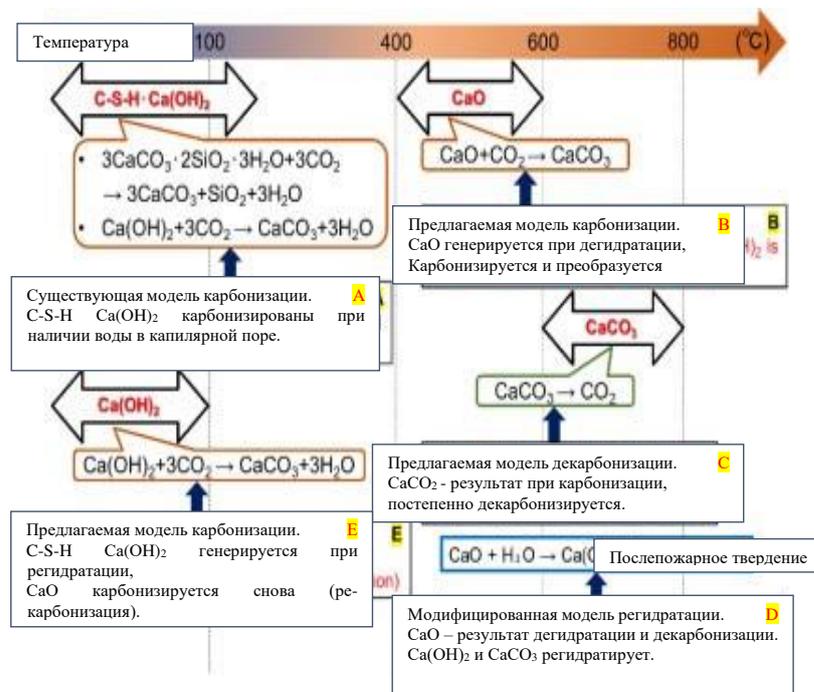


Рис. 3. Модели карбонизации, декарбонизации и рекарбонизации во время и после нагрева [10,11]

Карбонизация CaO при температуре выше 400 °C

Модель карбонизации негашеной извести CaO, генерируемой обезвоживанием Ca(OH)₂, вводится в случае нагрева до температуры + 100 °C. Согласно исследованию [16], CaO при разложении Ca(OH) мгновенно реагирует с CO₂CaCO₃ в температурном диапазоне 400–500°C. Если удерживается температурный диапазон, прочность бетона резко снижается [8] из-за увеличения пористости цементного камня при обезвоживании Ca(OH)₂.

Однако при высокой концентрации CO₂ карбонизация может уплотнить микропористую структуру и увеличить ее прочность [16]. Предполагается, что CaO, генерируемый разложением Ca(OH)₂, непосредственно вступает в реакцию с газом CO₂ в микропорах с образованием CaCO₃ (см. рис. 3B). Таким образом, предлагается модель карбонизации CaO:

$$R CaO = -CCaO \cdot MCO_2, \tag{1}$$

где R_{CaO} – количество прореагировавшего CaO с газом CO_2 (моль/м³), которое не превышает количество CaO (моль/м³), образующееся при обезвоживании $Ca(OH)_2$ [7, 8]; C_{CaO} – безразмерная величина, зависящая от значения высокой температуры CaO, которая предварительно принимается 1,0; M_{CO_2} – количество газа CO_2 в микропорах (моль/м³), которое рассчитывается по базовой исходной модели карбонизации [10, 11].

Декарбонизация $CaCO_3$ при температуре от 600 до 800 °С

Одной из моделей разложения гидратов цемента при высокой температуре является модель декарбонизации карбоната кальция $CaCO_3$, который генерируется карбонизацией C-S-H, $Ca(OH)_2$ и CaO. Согласно данным исследований [1–3], декарбонизация $CaCO_3$ происходит в диапазоне температур от 600 до 800 °С. В ранее уплотненной карбонизацией структуре пористость быстро увеличивается из-за разложения $CaCO_3$. Декарбонизация $CaCO_3$ оказывает большое влияние на прочность бетона при воздействии высокой температуры.

Предполагается, что $CaCO_3$, генерируемый карбонизацией C-S-H, $Ca(OH)_2$ и CaO, постепенно разлагается в диапазоне температур от 600 до 800 °С (см. рис. 3С). Таким образом, упрощенная модель декарбонизации представлена как

$$W_{d(CO_2),CaCO_3} = W_{CO_2,CaCO_3} \left(\frac{T_{max}-600}{800-600} \right) \quad (2)$$

$(600^\circ \leq T_{max} \leq 800^\circ)$

$$W_{d(CO_2),CaCO_3} = W_{CO_2,CaCO_3} \quad (3)$$

$(800^\circ < T_{max})$,

где $W_{d(CO_2),CaCO_3}$ – количество CO_2 , образующееся в результате декарбонизации $CaCO_3$ (моль/м³); $W_{CO_2,CaCO_3}$ – количество CO_2 , химически связанного в $CaCO_3$ (моль/м³); T_{max} – максимальная температура. Прогрессия количества этих минералов используется для определения пористости и распределения размеров пор на основе статистической функции [10, 11].

Рекарбонизация $Ca(OH)_2$ в процессе послепожарного отверждения

В бетоне после пожара происходит регидратация CaO при послепожарном отверждении [13, 15]. Процесс самовосстановления бетона при экспонировании в течение ночи используется для модернизации многомасштабной платформы [2, 4–6].

Модель регидратации интегрирована с моделью карбонизации. Не только CaO, генерируемый обезвоживанием $Ca(OH)_2$, но и CaO, генерируемый декарбонизацией $CaCO_3$, регидратируются в период послепожарного отверждения и превращаются в $Ca(OH)_2$ (см. рис. 3D).

Предполагается, что в присутствии CO_2 в атмосфере $Ca(OH)_2$, полученный при регидратации CaO, является газированным (рекарбонизация) в процессе карбонизации [2, 10, 11] (см. рис. 3). Модернизированная модель регидратации выражена следующим образом:

$$W_{r(CH),CaCO_3} = \int C_{rh,CaCO_3} \cdot \left(W_{d(CO_2),CaCO_3} \cdot \frac{18.0}{44.0} \right) \cdot W_{free} \cdot dt \quad (4)$$

$$W_{r(CH)} = W_{r(CH),Ca(OH)_2} + W_{r(CH),CaCO_3} \quad (5)$$

, к

где $W_{r(CH),CaCO_3}$ – масса регидратированной кристаллизованной воды $Ca(OH)_2$ – при регидратации CaO, которая образуется в ходе декарбонизации $CaCO_3$ (кг/м³); $C_{rh,CaCO_3}$ – скорость реакции регидратации CaO на основе $CaCO_3$ которая предварительно принимается как 0,5; W_{free} – масса свободной воды, которая реагирует с CaO; $W_{r(CH)}$ – масса всей регидратированной кристаллизованной воды $Ca(OH)_2$ (кг/м³); $W_{r(CH),Ca(OH)_2}$ – масса регидратированной кристаллизованной воды $Ca(OH)_2$, созданной регидратацией $Ca(OH)_2$ на основе CaO и равной 2020 (кг/м³) [4–6]

Регидратированный $\text{Ca}(\text{OH})_2$ может быть снова газирован (регазирован) на основе оригинальной модели карбонизации [2, 10, 11] (рис. 3Е). Расширение бетонных композитов и адгезия появляются, когда $\text{Ca}(\text{OH})_2$ генерируется регидратацией CaO . Предполагается, что это свойство не изменяется в модели регидратации, которая включена в модель карбонизации.

Согласно исследованиям [7, 14] усадка происходит в процессе карбонизации затвердевшего цементного камня. В данном исследовании модель включает оба события, то есть объемная усадка вводится при карбонизации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (см. таблицу).

Пропорции растворной смеси для образцов [7, 14]

| В/Ц (%) | Масса исходных материалов на 1м ³ смеси, кг/м ³ | | | | |
|---------|---|-----|-----|------|------|
| | п/ц | В | Ц | П | СП |
| 25 | 1,2 | 242 | 968 | 14,5 | 1162 |

Примечание. В – вода; Ц – цемент; П – мелкий заполнитель^{*1}; СП – суперпластификатор; п/ц – отношение мелкого заполнителя к цементу.

Экспериментальное исследование изменения прочности на сжатие в зависимости от концентрации CO_2 во время нагрева

Изменяющаяся прочность на сжатие представлена в зависимости от воздействия высококонцентрированного CO_2 при нагревании. Экспериментально создана среда с высокой концентрацией CO_2 с использованием затвердевшего при низкой температуре сухого льда CO_2 в электрической печи с высокой температурой (рис. 4). В результате в начале нагрева камера печи заполняется углекислым газом.

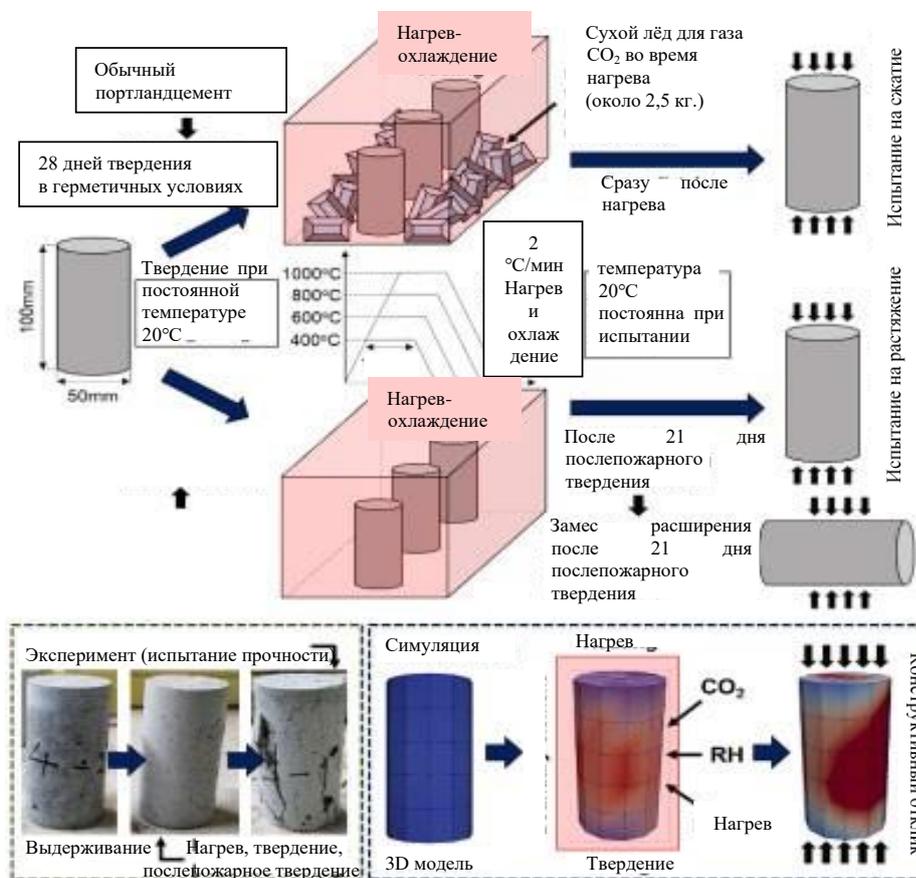


Рис. 4. Схема экспериментальных исследований [16]

Образец смеси высокопрочного раствора с водоцементным отношением 25% с использованием обычного портландцемента (см. таблицу) отверждали в герметичном состоянии при постоянной температуре 20° С в течение 28 дней. В этом эксперименте прочность на сжатие сравнивали при четырёх уровнях температуры нагрева 400, 600, 800 и 1000 °С с сухим льдом и без него (источник CO₂ в печи во время нагрева). Скорость изменения температуры составляла 2 °С/мин для нагрева и охлаждения. Температура поддерживалась на заданном уровне в течение одного часа. Тест на сжатие выполнялся при комнатной температуре поверхности испытуемых образцов (рис. 5).

Увеличение прочности на сжатие происходит при температуре 400°С по достижению высокой концентрации CO₂ в печи за счет сухого льда. Очевидна эффективность среды с высоким содержанием CO₂ для увеличения прочности.

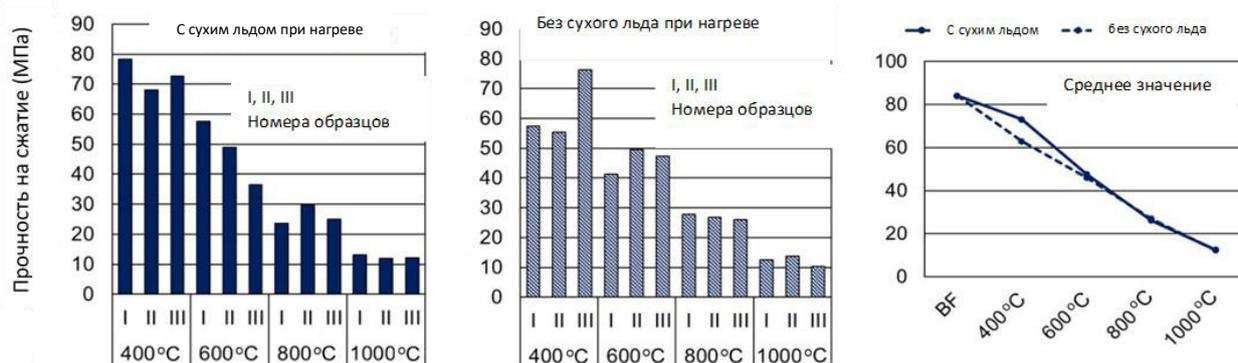


Рис. 5. Экспериментальные результаты влияния CO₂ при нагревании на изменение прочности на сжатие [17]

Микропоровая структура станет плотнее, а прочность на сжатие увеличится в зависимости от карбонизации CaO в диапазоне температур от 400 до 500 °С [16]. В мультискематическом анализе диффузия газа CO₂ рассматривается через материал с трещинами. Газ проникает глубже внутрь образцов по сравнению с нормальной температурой, при которой уплотненные карбонизацией слои находятся у поверхности.

Однако воздействие CO₂ не было зафиксировано при 600 °С. Есть две возможные причины: а) газ CO₂ быстро выбрасывался из нагревательной печи, а концентрация CO₂ едва ли менялась в диапазоне температур от 400 до 500 °С; б) декарбонизация, которая происходит обычно при температуре от 600 до 800 °С, произошла при несколько более низкой температуре. Можно заключить, что концентрация CO₂ при нагревании может изменять прочность на сжатие цементных композитов с микропорами.

Опытная валидация предлагаемой модели. Термогравиметрический анализ

Изменение массы затвердевшего цементного камня при высокотемпературном нагревании было подтверждено при термогравиметрическом анализе (TGA). Подтвержденное изменение массы вследствие обезвоживания и карбонизации цементного камня при высокотемпературном нагреве является валидацией предлагаемой модели для микропоровых структур при химических реакциях CO₂.

Согласно исследованию [16], опытный образец для TGA был изготовлен из цементного камня с водоцементным отношением 40% с использованием обычного портландцемента. После размещения образец запечатывался и твердел в течение 28 дней в среде с постоянной температурой 20 °С. Затем образец измельчался в порошок, измерялись изменение массы при повышении температуры до 1000 °С при потоке N₂ 10 °С/мин и расходе CO₂ – 5%.

Для потока N_2 в модели воспроизводились экспериментальные данные (рис. 6). Потеря массы из-за обезвоживания $Ca(OH)_2$ в диапазоне температур от 400 до 450 °C была незначительно завышена в предложенной модели. Для потока CO_2 – 5% в предлагаемой модели фиксировались увеличение массы из-за бонации CaO от 400 до 500 °C и потеря массы из-за декарбонизации $CaCO_3$ от 600 до 800°C. Таким образом, в предложенной модели воспроизводятся тенденции экспериментальных результатов.

Прочность на сжатие после нагрева с сухим льдом и без него

Предлагаемая модель дополнительно проверяется по прочности после нагрева с сухим льдом и без него. Вычисляется прочность цилиндра на сжатие с локальной температурой.

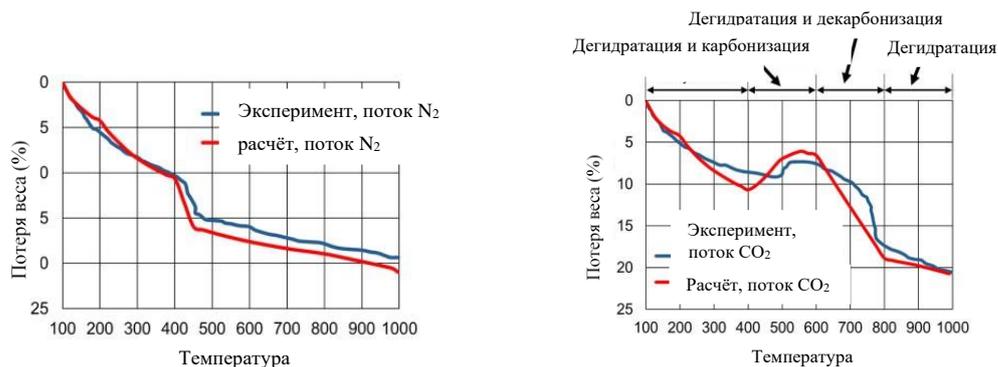


Рис. 6. Валидация: термогравиметрический анализ (потоки N_2 и CO_2 – 5%) [16]

Деформации не являются повсеместно однородными (см. рис. 4). Локальная прочность мезомасштабного цементного камня рассчитывается на основе микропоровых структур и исследуется в широком диапазоне водоцементного отношения, твердения и возраста материала

$$\Phi_K = f_\infty \left\{ 1 - \exp\left(-\alpha D_{hyd,out}^\beta\right) \right\}, \quad (6)$$

где f_c – прочность бетона на сжатие (МПа);

f_∞ – предел прочности на сжатие (МПа) [17];

$D_{hyd.out}$ – отношение объема гидратов цемента, вне частиц цемента к величине капиллярной пористости в начале гидратации [17];

α, β – постоянное значение 3,0 и 4,0 соответственно.

Учитываются микротрещивание и его влияние на локальные напряжения [1, 10, 11].

Измеренная концентрация CO_2 составляла 95% в печи в начале нагрева и снижалась до 0,03% от общей атмосферной концентрации CO_2 в конце экспериментов через 3 часа. Концентрация не могла быть измерена при высокой температуре внутри печи. Таким образом, предполагается линейное изменение концентрации CO_2 для граничных условий мультискематического моделирования.

Среднее экспериментальное и расчетное значение прочности на сжатие сравнивали для всех 5 уровней (рис. 7). Предложенная модель практически охватывает все экспериментальные результаты. Хотя прочность на сжатие была недооценена при 400°C, предложенная модель может воспроизвести разницу из-за наличия сухого льда. В соответствии с результатом TGA в потоке CO_2 имеются некоторые различия в потере массы из-за количества производимых C-S-H и $Ca(OH)_2$ и степени карбонизации. Большая потеря массы указывает на более активное разложение гидратов цемента. Таким образом, пористость микроструктуры увеличивается вследствие разложения гидратов цемента, а это приводит к снижению прочности на сжатие.

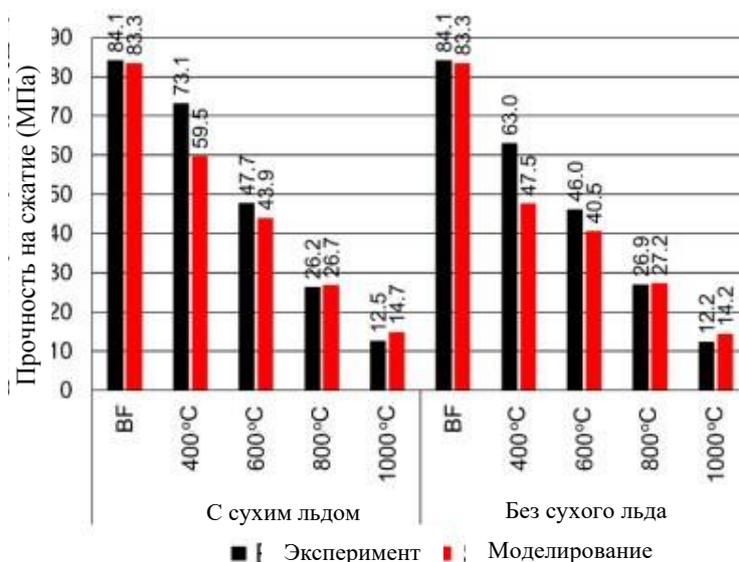


Рис. 7. Прочность на сжатие после нагрева с высокой концентрацией CO₂ при введении сухого льда и без него [17]

Деформация при послепожарном отверждении

Предлагаемая модель была исследована при экспериментальной оценке изменения размеров образца в период послепожарного отверждения. В этом эксперименте температура нагрева составляла 1000 °С, но были подготовлены четыре уровня относительной влажности (RH) среды при послепожарном отверждении = 30%, 60%. Скорость составляла 2 °С/мин для повышения и понижения температуры. Температура поддерживалась на уровне 1000 °С в течение одного часа. После нагревания и охлаждения образцы отверждались в течение 21 дня в каждой среде, после чего определялись изменения влажности и прочности (рис. 8)

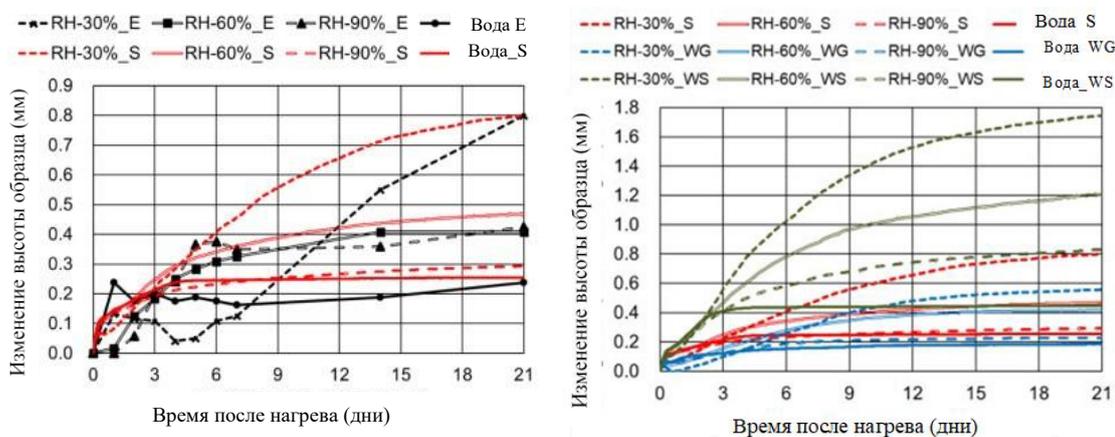


Рис. 8. Валидация: изменение высоты образца послепожарного твердения. Слева: E = эксперимент, S – моделирование; справа: S – моделирование, WG = модель без карбонизации, WS = модель без учета усадки при карбонизации [2]

Как показывают результаты параметрического исследования (см. рис. 8), расширение образца за счет поглощения атмосферной влаги невелико в модели, которая не учитывает саму карбонизацию. Это связано с тем, что количество CaO, генерируемого с учетом карбонизации, больше, чем без карбонизации. Изменение высоты образца через 21 день в 2 раза больше, чем у предлагаемой модели, если не рассматривается усадка при карбонизации. Подтверждено, что эффект усадки образца при карбонизации Ca(OH)₂ оказывает большое влияние на параметры образца. Необходимы более детальные эксперименты, связанные с объемным изменением из-за карбонизации.

Прочность на сжатие и растяжение после пожароотверждения

Предлагаемая модель изучена по экспериментально полученной прочности на сжатие и растяжение послепожарного твердения в различных средах. Спустя 21 день после пожарного твердения в различных условиях относительной влажности были проведены испытания на сжатие и трещиностойкость (рис. 9).

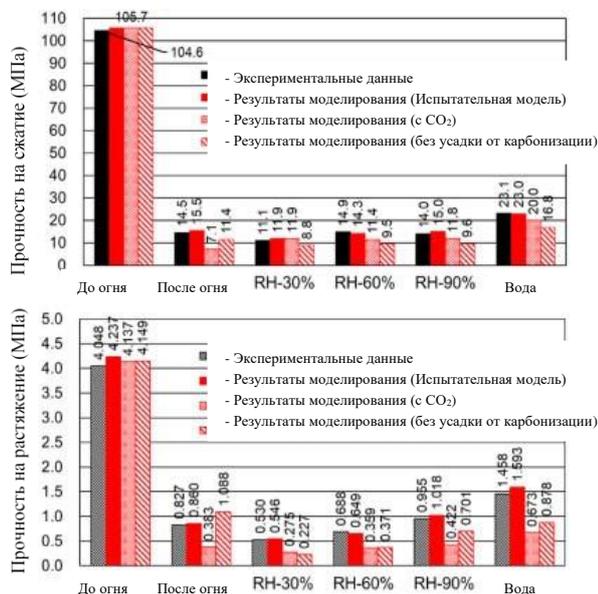


Рис. 9. Валидация: прочность на сжатие и растяжение после пожароотверждения [17]

Экспериментальные данные воспроизводятся с высокой точностью в предложенной модели. При отверждении RH-30% прочность на сжатие и растяжение ниже, чем сразу после нагрева. Модель позволяет фиксировать, что отрицательный эффект расширения при послепожарном отверждении преобладает при низкой влажности. В модели, которая не учитывает эффект усадки из-за карбонизации, прочность послепожарного отверждения также невелика. Это связано с тем, что отрицательный эффект расширения из-за регидратации превышает положительный эффект самовосстановления, поскольку карбонизационная усадка не учитывается.

Заключение

На основе многомасштабного моделирования при карбонизации в период высокотемпературного нагрева и после него сформулированы следующие выводы.

I. Предлагаются три модели с учётом карбонизации:

1) модель карбонизации CaO при высокой температуре; 2) модель декарбонизации CaCO₃ в диапазоне температур от 600 до 800 °C; 3) модель рекарбонизации Ca(OH)₂ послепожарного твердения, включенная в многомасштабную платформу для конструкционного бетона. В ходе экспериментов изменения массы, миграции влаги, прочности на сжатие и среды CO₂ предложенные модели были проверены с достаточной точностью.

II. Прочность на сжатие экспериментально подтверждена при увеличении температуры до 400 °C с выделением газа CO₂ из сухого льда. Прирост прочности был количественно воспроизведен при моделировании микроструктур из-за рекарбонизации.

III. На основе экспериментальных и аналитических исследований было выяснено, что имеются положительные и отрицательные эффекты, влияющие на прочность затвердевших материалов в процессе послепожарного отверждения. Положительный эффект достигнут благодаря процессу самовосстановления при регидратации и рекарбонизации. Отрицательный эффект возникает из-за процесса саморазрушения вследствие структурного расширения.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 12–17.
2. Леонович С.Н. Трещиностойкость высокопрочного бетона после воздействия высоких температур // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН: сборник научных трудов*. Москва, 2018. С. 301–310.
3. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография. В 2 ч. Ч. 1 / С.Н. Леонович [и др.], под ред. С.Н. Леоновича. Минск: БНТУ, 2016. 393 с.
4. Alonso C., Fernandez L. Dewatering and rehydration processes for cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of Materials Science*. 2004;39(9):3015-3024.
5. Higuchi K., Iwama K., Maekawa K. Remaining shear capacity of fire damaged high strength RC beams after wet curing. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2021;19(8):897-912.
6. Ishida T., Li C.H. Thermohygrophysics based carbonization modeling with strong coupling of mass transfer and equilibrium in the micropore structure of concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2008;6(2):303-316.
7. Iwama K., Higuchi K., Maekawa K. Model evaluation of long-term serviceability and fire resistance of underground reinforced concrete ducts. *Structural Engineering International*. 2020;30(4):506-514.
8. Iwama K., Higuchi K.; Maekawa K. Thermomechanistic multi-scale modeling of structural concrete at high temperature. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2020;18(5):272-293.
9. Iwama K., Kato Y., Baba S., Higuchi K., Maekawa K. Accelerated moisture transport through local weakness in high-strength concrete exposed to high temperature. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2021;19(2):106-117.
10. Kangni-Foli E., Poyet S., Le Bescop P., Charpentier T., Bernachy-Barbé F., Dauzères A., L'Hôpital E., d'Espinose de Lacaillerie J.B. Carbonization of Model Cement Pastes: The Mineralogical Origin of Microstructural Change and Shrinkage. *Cement and Concrete Study*. 2021;144:106446.
11. Li Z., Li L., Wang J., Wu X. Effect of elevated temperature on meso- and microstructure and compressive strength of high-strength concrete and mortar containing blast-furnace slag. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2018;16(10):498-511.
12. Liu J.C., Tan K.H., Yao Y. A new look at the nature of fire fighting in concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;184:581-590.
13. Majekava K., Isida T., Kisi T. *Multi-scale modeling of structural concrete*. London, Taylor & Francis, 2008.
14. Maekawa K., Pimanmas A., Okamura H. *Nonlinear mechanics of reinforced concrete*. London and New York, Spon Press, 2003.
15. Oliveira J.A., Ribeiro J.C.L., Pedroti L.G., Faria C.S., Nalon G.H., Oliveira A.L. Durability of concrete after a fire due to accelerated carbonization tests. *Materials Research*. 2019;22(1):1-7.
16. Park S.J., Yim H.J., Kwak H.G. Influence of post-fire curing conditions on the restoration of material properties of fire-damaged concrete. *Construction and Building Materials*. 2015;99:90-98.
17. Sabeur H., Platret G., Vincent J. Compositional and microstructural changes in aged cement are inserted under two heating-cooling regimens studied by thermal analysis and X-ray diffraction. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016;126:1023-1043.
18. Suh H., Jee H., Kim J., Kitagaki R., Ohki S., Woo S., Jeong K., Bae S. Effect of rehydration conditions on mechanical and atomic structural recovery characteristics of Portland cement paste exposed to elevated temperatures. *Construction and building materials*. 2020;235:117453.
19. Yatsushiro D., Atarashi D., Yoshida N., Okumura Y. Investigation of the carbonization mechanism of hardened cement paste due to fire damage. At the 41st JCI Technical Conference, Sapporo, July 10-12, 2019. Tokyo, JapanConcrete, 2019.
20. Otabe Y., Kishi T. Development of a hydration and strength model for assessing concrete quality. *Industrial Science (University of Tokyo)*. 2005;57(2):37-42. (In Jap.).

Original article

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-2/73-85>

Leonovich S., Chao Feng, Miao Jijun, Junwei Liu, Malyuk V., Shaly E., Litvinovsky D., Kolodey A., Stepanova A.

SERGEY N. LEONOVICH, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department, Chief Researcher of the Center for Scientific Research and Testing of Building Structures, leonovichsn@tut.by

ALINA V. KOLODEY, Engineer of the Department "Building materials and construction technology" *Belarusian National Technical University*

DMITRY A. LITVINOVSII, Chief Engineer

InzhSpetsStroyProekt LLC

Minsk, Republic of Belarus

CHAO FENG, MIAO JIJUN, JUNWEI LIU

Qingdao University of Technology

Qingdao, China

VLADISLAV V. MALYUK, Senior Lecturer, Department of Construction

Technical Oil and Gas Institute

Sakhalin State University

Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

EVGENIY E. SHALY, Leading Engineer,

PrimorProjectBureau LLC

Vladivostok, Russia

ANNA V. STEPANOVA, Senior Lecturer of the Department "Building technologies and structures"

Belarusian State University of Transport

Gomel, Republic of Belarus

Structural concrete at high temperature: carbonization, decarbonization and recarbonization

Abstract. The multichemophysical model of the processes of carbonization, decarbonization and recarbonization of concrete at high temperatures is analyzed. Experimental validation of the integrated model is carried out using thermogravimetric tests of cement stone and the strength of mortar composites immediately after high-temperature heating and after fire curing. CO₂ concentration and humidity are experimentally varied as thermodynamic boundary conditions for wide range testing and validation. Compressive strength is not considered as a property of the material, but as a calculated structural characteristic of a cylindrical solid, where temperature, degree of hydration and carbonization develop unevenly. The developed model makes it possible to study wet, fire-damaged concrete as a composite multiscale material.

Keywords: concrete, high temperature, fire curing, carbonization, decarbonization, recarbonization models

For citation: Leonovich S., Chao Feng, Miao Jijun, Junwei Liu, Malyuk V., Shaly E., Litvinovsky D., Kolodey A., Stepanova A. Structural concrete at high temperature: carbonization, decarbonization and recarbonization. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(2):73-85. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A. Destruction viscosity of high-strength concrete after high temperature impact. *Construction materials*. 2017;(11):12-17. (In Russ.).
2. Leonovich S.N. Crack resistance of high-strength concrete after exposure to high temperatures. Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN. Collection of scientific papers of the RAASN. Moscow, 2018. P. 301-310. (In Russ.).

3. Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion effects: monograph: in 2 hours, Part 1 / S.N. Leonovich [et al.], ed. S.N. Leonovich. Minsk, BNTU, 2016. 393 p. (In Russ.).
4. Alonso C., Fernandez L. Dewatering and rehydration processes for cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of Materials Science*. 2004;39(9):3015-3024.
5. Higuchi K., Iwama K., Maekawa K. Remaining shear capacity of fire damaged high strength RC beams after wet curing. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2021;19(8):897-912.
6. Ishida T., Li C.H. Thermohygrophysics based carbonization modeling with strong coupling of mass transfer and equilibrium in the micropore structure of concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2008;6(2):303-316.
7. Iwama K., Higuchi K., Maekawa K. Model evaluation of long-term serviceability and fire resistance of underground reinforced concrete ducts. *Structural Engineering International*. 2020;30(4):506-514.
8. Iwama K., Higuchi K.; Maekawa K. Thermomechanistic multi-scale modeling of structural concrete at high temperature. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2020;18(5):272-293.
9. Iwama K., Kato Y., Baba S., Higuchi K., Maekawa K. Accelerated moisture transport through local weakness in high-strength concrete exposed to high temperature. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2021;19(2):106-117.
10. Kangni-Foli E., Poyet S., Le Bescop P., Charpentier T., Bernachy-Barbé F., Dauzères A., L'Hôpital E., d'Espinose de Lacaillerie J.B. Carbonization of Model Cement Pastes: The Mineralogical Origin of Microstructural Change and Shrinkage. *Cement and Concrete Study*. 2021;144:106446.
11. Li Z., Li L., Wang J., Wu X. Effect of elevated temperature on meso- and microstructure and compressive strength of high-strength concrete and mortar containing blast-furnace slag. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2018;16(10):498-511.
12. Liu J.C., Tan K.H., Yao Y. A new look at the nature of fire fighting in concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;184:581-590.
13. Majekava K., Isida T., Kisi T. Multi-scale modeling of structural concrete. London, Taylor & Francis, 2008.
14. Maekawa K., Pimanmas A., Okamura H. Nonlinear mechanics of reinforced concrete. London and New York, Spon Press, 2003.
15. Oliveira J.A., Ribeiro J.C.L., Pedroti L.G., Faria C.S., Nalon G.H., Oliveira A.L. Durability of concrete after a fire due to accelerated carbonization tests. *Materials Research*. 2019;22(1):1-7.
16. Park S.J., Yim H.J., Kwak H.G. Influence of post-fire curing conditions on the restoration of material properties of fire-damaged concrete. *Construction and Building Materials*. 2015;99:90-98.
17. Sabeur H., Platret G., Vincent J. Compositional and microstructural changes in aged cement are inserted under two heating-cooling regimens studied by thermal analysis and X-ray diffraction. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016;126:1023-1043.
18. Suh H., Jee H., Kim J., Kitagaki R., Ohki S., Woo S., Jeong K., Bae S. Effect of rehydration conditions on mechanical and atomic structural recovery characteristics of Portland cement paste exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2020;235:117453.
19. Yatsushiro D., Atarashi D., Yoshida N., Okumura Y. Investigation of the carbonization mechanism of hardened cement paste due to fire damage. At the 41st JCI Technical Conference, Sapporo, July 10-12, 2019. Tokyo, JapanConcrete, 2019.
20. Otabe Y., Kishi T. Development of a hydration and strength model for assessing concrete quality. *Industrial Science (University of Tokyo)*. 2005;57(2):37-42. (In Jap.).