

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 666.97-98

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1135-1153

Аппроксимация теплофизических свойств бетона для решения нелинейной задачи теплопроводности железобетонных конструкций в условиях пожара

Ашот Георгиевич Тамразян¹, Вадим Ростиславович Мешков²,
Виталий Сергеевич Геращенко^{1,3}, Андрей Сергеевич Гришин^{1,3}

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

² *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); г. Санкт-Петербург, Россия;*

³ *Атомэнергопроект; г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Настоящая статья посвящена разработке методов аппроксимации теплофизических свойств бетона при решении нелинейной задачи теплопроводности. Исследование актуально в контексте оценки огнестойкости строительных конструкций и повышения их безопасности в условиях пожара. Цель работы заключается в создании универсальных моделей зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры, что позволяет улучшить точность расчетов температурных полей.

Материалы и методы. Для анализа использованы экспериментальные данные из множества источников, а также известные стандарты (например, Eurocode 2). Применяются методы наименьших квадратов для построения регрессионных и аппроксимаций. Рассмотрены различные типы бетона — от легких до тяжелых — и их поведение при нагреве до высоких температур. Анализируется влияние таких факторов, как пористость, состав заполнителя, влажность, на теплофизические характеристики материала.

Результаты. Получены новые аппроксимационные формулы для коэффициента теплопроводности бетона как функции плотности и температуры. Показано, что зависимость может быть успешно описана универсальной экспоненциальной моделью. Для удельной теплоемкости предложена линейная аппроксимация, которая демонстрирует хорошее совпадение с экспериментальными данными. Установлено, что эффективная теплоемкость возрастает в определенных диапазонах температур за счет эндотермических процессов, таких как дегидратация цементного камня и декарбонизация известняка. Результаты подтверждены сравнением с существующими моделями и нормативами.

Выводы. Разработанные аппроксимационные модели позволяют более точно прогнозировать поведение бетона при воздействии высоких температур. Это имеет важное практическое значение для проектирования огнестойких конструкций, особенно в ядерной энергетике и других отраслях, где безопасность играет ключевую роль. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения существующих инженерных подходов и создания новых стандартов. В дальнейшем планируется продолжить исследования с учетом дополнительных факторов, таких как массоперенос и изменение структуры материала в ходе нагрева.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплофизические свойства, бетон, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, аппроксимация, огнестойкость, нелинейная задача теплопроводности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тамразян А.Г., Мешков В.Р., Геращенко В.С., Гришин А.С. Аппроксимация теплофизических свойств бетона для решения нелинейной задачи теплопроводности железобетонных конструкций в условиях пожара // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1135–1153. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1135-1153

Автор, ответственный за переписку: Виталий Сергеевич Геращенко, geraschenko_vs@aep.ru.

Approximation of concrete thermophysical properties to solve the nonlinear problem of heat conduction of reinforced concrete structures under fire conditions

Ashot G. Tamrazian¹, Vadim R. Meshkov²,
Vitaliy S. Gerashchenko^{1,3}, Andrei S. Grishin^{1,3}

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation;

³ Atomenergoproekt; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This paper is dedicated to the development of methods for approximating the thermophysical properties of concrete when solving a nonlinear heat conduction problem. The research is relevant in the context of assessing the fire resistance of building structures and enhancing their safety during fires. The goal of the work is to create universal models that describe the dependence of the thermal conductivity coefficient and specific heat capacity on temperature, which will improve the accuracy of temperature field calculations.

Materials and methods. Experimental data from numerous sources, as well as known standards (e.g., Eurocode 2), were used for analysis. The study employs the method of least squares (MLS) for constructing regressions and approximations. Various types of concrete — from lightweight to heavyweight — and their behaviour when heated to high temperatures were considered. Special attention was given to the influence of porosity, aggregate composition, and moisture content on the material's thermophysical characteristics.

Results. New approximation formulas for the thermal conductivity coefficient of concrete as a function of density and temperature have been obtained. It has been shown that this dependence can be successfully described by a universal exponential model. A linear approximation for specific heat capacity was proposed, demonstrating good agreement with experimental data. It was established that effective heat capacity increases within certain temperature ranges due to endothermic processes such as cement stone dehydration and limestone decarbonization. The results were confirmed by comparison with existing models and regulations.

Conclusions. The approximation models developed in this work allow for more accurate predictions of concrete behaviour under high-temperature exposure. This has significant practical importance for designing fire-resistant structures, especially in nuclear energy and other sectors where safety plays a crucial role. The findings can be used to improve existing engineering approaches and develop new standards. Future research is planned to consider additional factors, such as mass transfer and changes in material structure during heating.

KEYWORDS: thermophysical properties, concrete, thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, approximation, fire resistance, nonlinear heat conduction problem

FOR CITATION: Tamrazian A.G., Meshkov V.R., Gerashchenko V.S., Grishin A.S. Approximation of concrete thermophysical properties to solve the nonlinear problem of heat conduction of reinforced concrete structures under fire conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1135-1153. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1135-1153 (rus.).

Corresponding author: Vitaliy S. Gerashchenko, geraschenko_vs@aep.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность решения задачи огнестойкости бетонных строительных конструкций в условиях пожара не вызывает сомнений, особенно в контексте повышения безопасности зданий и сооружений. Одним из ключевых факторов, влияющих на поведение бетона при воздействии высоких температур, являются его теплофизические свойства — коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость. Эти параметры существенно изменяются при нагреве материала.

Данная работа служит продолжением предыдущих исследований авторов [1], направленных на решение нелинейной задачи теплопроводности бетона при одностороннем нагреве в условиях «стандартного пожара». Основная цель настоящего исследования заключается в создании универсальных моделей зависимости коэффициента теплопроводности

и удельной теплоемкости от температуры, которые помогли бы улучшить точность расчетов температурных полей.

Моделирование температурных полей в бетонных конструкциях в условиях пожара — достаточно сложная задача, особенно если учитывать специфические свойства материала. Одна из существенных особенностей, усложняющих моделирование и анализ, состоит в том, что теплофизические параметры бетона — его удельная плотность ρ , удельная теплоемкость c и коэффициент теплопроводности k — изменяются при изменении температуры.

Для быстрой оценки температурного состояния бетонных конструкций используют линейное приближение, считая теплофизические параметры постоянными. Более точную картину позволяет получить численное моделирование с учетом информации о теплофизических свойствах конкретной марки бетона. В таких расчетах применяют темпера-

турные зависимости из стандартов типа Eurocode 2¹, причем для разных типов бетонов эти зависимости различны. Так, например, отечественный стандарт СП 468.1325800.2019² предлагает использовать линейные зависимости $c(T)$ и $k(T)$ удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры. При этом в уравнении теплопроводности (см. раздел «Нелинейная основная тепловая задача оценки огнестойкости») появляются четыре параметра, зависящие от вида бетона. Их число можно уменьшить до двух, переходя к приведенному времени. Зависимость теплофизических свойств от температуры усложняет построение приближенных решений задачи теплопроводности.

На практике нередко бывает так, что единственным достоверно известным параметром бетона является его удельная плотность ρ . Даже для конструкций, уже находящихся в эксплуатации, значение плотности ρ можно получить без дорогостоящих тепловых испытаний. Поэтому было бы удобно иметь формулы, которые, с одной стороны, учитывают характерное изменение параметров c и k с изменением температуры, а с другой стороны, привязаны к наиболее «осязаемой» характеристике бетона — его плотности.

В данной работе авторы предлагают новые универсальные (для разных типов бетона) аппроксимации зависимостей $c(T)$ и $k(T)$. Эти аппроксимации позволяют вести расчет температурных полей в условиях минимальной информации о теплофизических свойствах конкретного бетона. В этом заключается новизна публикуемых результатов.

Предлагаемые аппроксимации построены путем анализа большого объема экспериментальных и теоретических сведений о бетонах, которые можно найти в отечественной и иностранной литературе.

Простая структура аппроксимаций $c(T)$ и $k(T)$ дает возможность надеяться, что можно построить достаточно простые приближенные формулы для решения нелинейной задачи (2), аналогичные предложенным авторами, но более полно учитывающие особенности теплообмена в условиях пожара. Вывод таких формул станет предметом дальнейших исследований.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы для улучшения существующих инженерных подходов к расчетам огнестойкости, а также для создания новых нормативных докумен-

¹ EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules. Structural fire design. CEN, Brussels, 2004. P. 97.

² СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности : введен 11.06.2020.

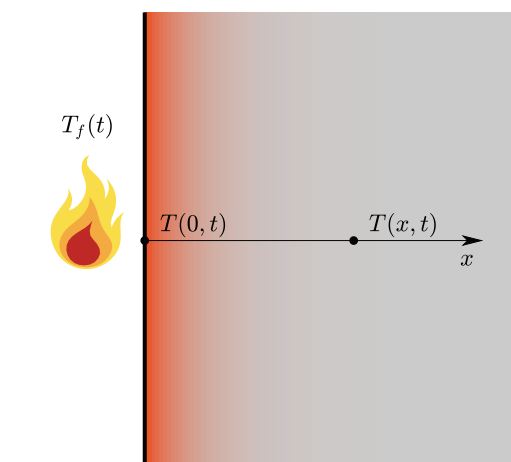


Рис. 1. Задача о нагреве полупространства

Fig. 1. The problem of heating a half-space

тов и стандартов. Практическая значимость работы состоит в возможности применения предлагаемых моделей в реальных проектах, что будет способствовать повышению уровня безопасности строительных конструкций и снижению рисков при возникновении пожаров.

Статья начинается с постановки одномерной нелинейной задачи теплопроводности, чтобы ввести основные обозначения и показать роль зависимостей $c(T)$ и $k(T)$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нелинейная основная тепловая задача оценки огнестойкости

Как отмечалось в работе [1], одномерная задача теплопроводности для полубесконечного тела является основной модельной задачей при оценке огнестойкости бетонных конструкций. На основе решения одномерной задачи построены известные приближенно-аналитические методы расчета температурных полей как при одностороннем нагреве элементов конструкции, так и при нагреве с двух, трех или четырех сторон¹, ACI 216.1-07 (TMS-216-07)³ [2–6].

В публикации [1] приводился простейший вариант одномерной задачи теплопроводности — линейная задача с граничным условием первого рода. В настоящей работе рассмотрим задачу о нагреве полубесконечного тела в условиях стандартного пожара в нелинейной постановке с учетом всех механизмов теплообмена на поверхности.

Напомним, что «стандартным» называется огневое воздействие с изменением температуры $T_f(t)$

³ ACI 216.1-07 (TMS-216-07). Code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies. 2007. P. 35.

пламени (flame, fire) по стандартной температурной кривой^{1,2}:

$$T_f(t) = T_0 + \Phi_0(t); \quad \Phi_0(t) = 345 \lg(1 + 0,133t), \quad (1)$$

где T_0 — начальная температура конструкции в момент возникновения пожара (в расчетах обычно принимают $T_0 = 20$ °С).

Математическая постановка одномерной задачи о воздействии стандартного пожара на полупространство (рис. 1) имеет следующий вид:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad x \in [0, \infty);$$

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha (T_f - T|_{x=0}) + \varepsilon \sigma_0 (T_f^4 - T^4|_{x=0}); \quad (2)$$

$$T|_{t=0} = T_0; \quad T \rightarrow T_0, \quad x \rightarrow \infty,$$

где $\rho c(T)$, $k(T)$ — теплофизические параметры материала (плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности); T_f — температура пламени согласно формуле (1); α — коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К); ε — приведенная степень черноты; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) постоянная Стефана–Больцмана.

Уравнение теплопроводности (2) учитывает изменение теплофизических свойств бетона при повышении температуры. Это изменение может быть существенным в диапазоне температур, характерном для пожаров в зданиях. Следовательно, для решения задачи (2) необходимо знать зависимости $c(T)$, $k(T)$. Подробному изучению этих зависимостей авторы посвящают отдельный параграф.

В граничном условии при $x=0$ учитываются конвективная и лучистая составляющие теплообмена на поверхности. Некоторые авторы отмечают, что температура продуктов сгорания, участвующих в конвективном теплообмене, и равновесная температура излучения пламени, вообще говоря, отличаются [7]. Чтобы учесть это обстоятельство, Викстрем [6] предлагает использовать в качестве T_f некоторую среднюю «адиабатическую температуру» пожара.

Нелинейная задача (2) не имеет аналитического решения даже в простейшем случае, когда теплофизические параметры постоянны — $c(T) = c_0$, $k(T) = k_0$. Далее индексом «0» будем обозначать значения параметров при температуре, равной начальной температуре T_0 .

Стоит отметить, что, несмотря на учет основных физических факторов, нелинейная основная задача остается лишь приближенной моделью реального процесса распространения тепла в условиях пожара. В частности, постановка (2) не учитывает явление массопереноса в теле бетона, изменение оптических свойств поверхности при изменении температуры, изменение интенсивности конвекции в ходе пожара. Эти и другие факторы невозможно учесть в рамках приближенно-аналитического под-

хода. Более того, даже при численном моделировании они, как правило, не принимаются во внимание. В качестве примера работы, где принимается во внимание перенос влаги в процессе нагрева, можно привести статью [8]. Несмотря на наличие подобных публикаций, авторы трудов [9, 10] подчеркивают, что в настоящее время не существует способа удовлетворительного учета влияния массопереноса на процессы теплопроводности в условиях пожара.

Прежде чем переходить к исследованию зависимостей $c(T)$ и $k(T)$ удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры, приведем небольшой обзор литературы, посвященной теплофизическим свойствам бетонов.

Теплофизические свойства бетонов в условиях пожара

Для достоверного описания температурных полей в бетонных конструкциях необходимо учитывать изменения свойств бетона при повышении температуры в условиях огневого воздействия. Бетон — материал со сложным составом и высокой степенью неоднородности. Его физические свойства зависят от множества факторов: химического состава связующего, типа и фракционного состава наполнителя, водоцементного соотношения, армирующих материалов и т.д. Поэтому прогнозировать его теплофизические свойства и характер влияния на них повышенной температуры в столь широком диапазоне ее изменения (0–1200 °С) очень сложно. Большинство строительных материалов нестабильны в этом температурном диапазоне и претерпевают различные физико-химические превращения.

Самым надежным способом получения данных о теплофизических свойствах бетона, по-прежнему, остается эксперимент. Хотя имеются и примеры успешного применения аналитических методов.

Приведем краткий обзор литературы, посвященной теплофизическим свойствам бетонов. Работы, относящиеся к этой области, можно условно разделить на несколько групп:

- к первой группе можно отнести исследования, в которых рассматриваются теплофизические свойства бетонов различных типов при нормальных температурных условиях. Свойства бетонов при нормальных температурах нужны, прежде всего, для расчета тепловой эффективности зданий в условиях нормальной эксплуатации. Здесь имеются как экспериментальные работы [11–17], так и общестроительные справочники [18, 19];
- в публикациях второй группы изучаются свойства бетонов при повышенных температурах. Экспериментальные работы в этой области многочисленны и появляются регулярно [20–30]. Соответствующие данные необходимы для оценки стойкости бетонных конструкций к воздействию пожара [20, 22, 24, 25, 29], а также для специальных при-

ложений бетонов: в ядерной энергетике [18, 21, 26, 31–33] и в сравнительно новой сфере — солнечной энергетике для аккумулирования тепла [27, 28]. Отдельно стоит отметить работы, в которых наряду с экспериментальными методами используются аналитические методы оценки теплофизических параметров при повышенных температурах [9, 34–36];

- третью группу составляют многочисленные инженерные руководства по пожарной безопасности [2, 4–6, 9, 10, 37–41]. В этих работах можно найти табличные данные по свойствам бетонов в условиях повышенных температур, а также разнообразные инженерные формулы, аппроксимирующие температурные зависимости $k(T)$, $c(T)$ для бетонов разных типов;

- четвертая группа источников — это различные государственные и отраслевые стандарты и нормативные документы, например Eurocode 2, СП 468.1325800.2019, ACI 216.1-07 (TMS-216-07), ACI/TMS 122R-14[3]. В этих трудах фиксируются осредненные зависимости для вычисления удельной теплоемкости c и коэффициента теплопроводности k , рекомендуемые для инженерных расчетов. Подобные расчетные формулы выводятся путем регрессионного анализа некоторого объема экспериментальных данных. Поскольку новые экспериментальные сведения продолжают появляться регулярно, указанные стандарты время от времени подвергаются ревизии;

- в отдельную группу можно объединить обзорные работы по свойствам бетонов [7, 15, 22, 32, 37, 42–46]. Такие публикации содержат данные из большого количества источников, сводные таблицы, графики и анализ различий и общих тенденций.

Читателю, желающему подробно познакомиться с современным состоянием вопроса, авторы рекомендуют обратить внимание, в первую очередь, на обзоры [15, 32, 45], как на наиболее информативные и актуальные.

В результате изучения перечисленных выше источников авторы собрали большое количество экспериментальных и теоретических сведений о теплофизических свойствах бетонов. Найденные табличные и графические данные были оцифрованы, приведены в единый массив и в таком виде проанализированы.

Отметим, что среди использованных публикаций есть как классические [19, 34, 35, 47, 48], так и современные [10, 16, 17, 28, 29, 41, 44–46].

Перейдем к обсуждению основных закономерностей, которым подчиняются зависимости $k(T)$ и $c(T)$ для бетонов различных видов. Покажем, что можно предложить достаточно простые формулы, хорошо отражающие характер этих зависимостей и пригодные как для легких бетонов, так и для бетонов стандартных и тяжелых марок, в том числе армированных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Коэффициент теплопроводности

Коэффициент теплопроводности k , Вт/м·К, характеризует способность материала перераспределять тепловую энергию по объему и связывает вектор теплового потока с градиентом поля температуры:

$$q = -k\nabla T.$$

Чем выше коэффициент теплопроводности материала, тем меньше перепады температуры внутри тела.

В стационарном состоянии поле температуры полностью зависит от величины k , поскольку параметры c и ρ входят только в нестационарную (левую) часть уравнения теплопроводности (2). Стационарное решение используется, например, при расчете тепловой эффективности зданий. Для подобного расчета достаточно знать только коэффициенты теплопроводности материалов. Поэтому многие публикации отдельно посвящены определению коэффициента теплопроводности бетонов [11, 14, 15, 17, 28, 45, 47]. Отметим, что тепловые процессы в условиях пожара существенно нестационарны.

Остановимся вначале на теплофизических свойствах бетонов при нормальной температуре.

Корреляция $k_0(\rho)$ «коэффициент теплопроводности – плотность бетона»

Бетон — неоднородный и пористый материал. Пористость бетона зависит от водоцементного соотношения, способа и температуры замешивания, а также других факторов. На одном и том же связующем можно получить бетоны различной пористости (и удельной плотности). Ясно, что коэффициент теплопроводности k_0 бетона при нормальной температуре существенно зависит от его пористости. И действительно, особенно сильная корреляция значения k_0 с удельной плотностью ρ бетона наблюдается для легких (сильнопористых) бетонов [11, 14, 18, 19].

В то же время бетоны с примерно одинаковой удельной плотностью, но на разных заполнителях могут иметь различные коэффициенты теплопроводности. Стандартные значения для коэффициентов теплопроводности наиболее распространенных заполнителей таковы, Вт/(м·К): базальт — 1,4; мрамор — 2,7; гранит и известняк — 3,1; доломит — 3,6; песчаник — 3,9; кварцит — 4,3 [45].

Тем не менее оказывается, что теплопроводность бетона в большей степени зависит от его плотности, нежели от его состава [33]. Если совместить имеющиеся в литературе экспериментальные значения (ρ , k_0) на одном графике, то можно увидеть сильную корреляцию этих параметров.

На рис. 2 представлены данные, взятые из источников [11, 13, 15–19, 21–23, 28, 34, 49], — всего около 270 экспериментальных точек (без дубликатов). Как видно из графика, для легких бетонов ($\rho < 1500$ кг/м³) «кучность» экспериментальных

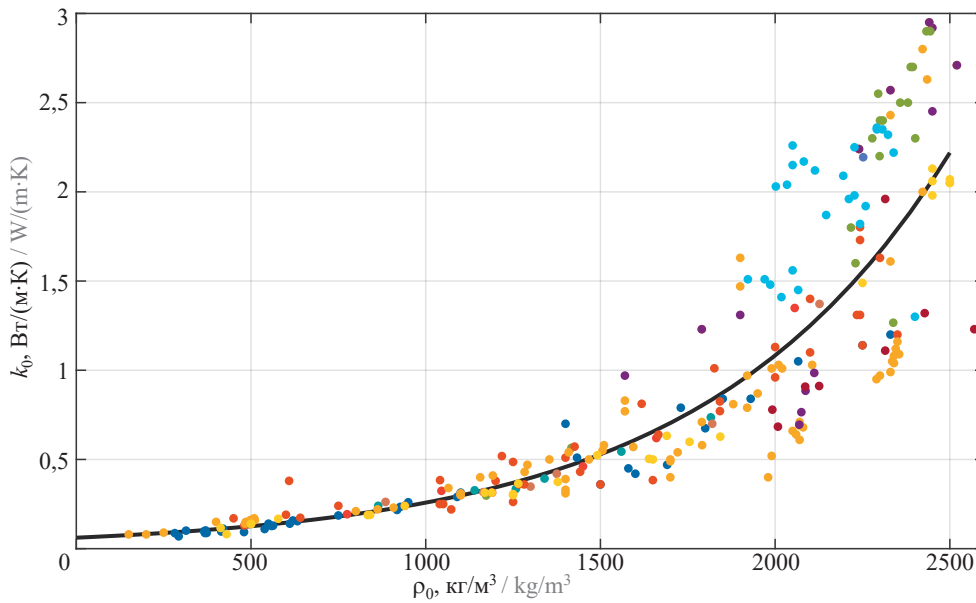


Рис. 2. Зависимость теплопроводности k_0 бетона от его плотности

Fig. 2. The dependence of the thermal conductivity k_0 of concrete on its density

данных вблизи кривой регрессии выше, чем для бетонов высокой плотности.

Еще в середине прошлого века для аппроксимации зависимости (ρ, k_0) было предложено использовать экспоненциальную формулу вида $k_0 = \alpha \exp(b\rho)$ (Jacob curve — кривая Джейкоба) [11]. В дальнейшем появилось несколько вариантов таких аппроксимаций с различными значениями коэффициентов α и b . Например, в ACI/TMS 122R14 рекомендуется рассчитывать теплопроводность стандартных бетонов ($\rho \in [1280, 2240]$ кг/м³) при нормальной влажности по экспоненциальной формуле:

$$k_0 = 0,087 \exp(1,25\rho/1000),$$

тогда как ACI 216.1-07 (TMS-216-07) предлагает в отсутствие достоверных данных о теплофизических свойствах бетона использовать немного другое значение коэффициента α : $\alpha = 0,072$. Иногда коэффициенты α и b определяют отдельно для бетонов разных классов. Подробный обзор существующих вариантов можно найти в публикациях [15, 45]. По мнению авторов настоящего исследования, применять экспоненциальную аппроксимацию имеет смысл только как универсальную: для отдельных классов бетонов вполне достаточно линейной регрессии.

По данным рис. 2 также определили при помощи методов наименьших квадратов (МНК) оптимальные значения коэффициентов (коэффициент детерминации $R^2 = 0,933$). Полному набору экспериментальных данных лучше всего соответствует функция:

$$k_0 = 0,0614 \exp(1,435\rho/1000), \quad (3)$$

график которой представлен на рисунке. Заметим, что для зависимости из стандарта ACI 216.1-07

(TMS-216-07) коэффициент детерминации на рассматриваемом массиве данных составляет $R^2 = 0,899$.

В ходе анализа массива сведений было сделано следующее наблюдение. Если взять результаты экспериментов, в которых определялся не только коэффициент теплопроводности k_0 , но и удельная теплоемкость c_0 , то оказывается, что коэффициент корреляции для зависимости $k_0(c_0\rho)$ заметно выше, чем для зависимости $k_0(\rho)$ ($R^2 = 0,952$ и $R^2 = 0,938$), особенно в области, соответствующей бетонам нормальной плотности. Графически это выражается в том, что пары значений $(\rho, k_0/c_0)$ кучнее расположены возле кривой регрессии, чем пары (ρ, k_0) . Это иллюстрирует рис. 3.

Рис. 3 построен авторами по данным из источников [13, 16, 19, 22–34] — всего примерно 130 точек.

Методом наименьших квадратов построена экспоненциальная аппроксимация:

$$k_0/c_0 = 6,55 \cdot 10^{-5} \exp(1,53\rho/1000). \quad (4)$$

В условиях отсутствия экспериментальных данных рекомендуем использовать именно эту зависимость для оценки теплофизических параметров бетонов любых типов, поскольку с ее помощью можно сразу (не обращаясь к данным по теплоемкости) рассчитать температуропроводность бетона при нормальных условиях:

$$\alpha_0 = \frac{k_0}{c_0\rho} = \frac{6,55 \cdot 10^{-5}}{\rho} \exp(1,53\rho/1000).$$

Отметим, что в отечественной литературе можно встретить ряд формул, отличных по виду от выражения (3), описывающих связь плотности и теплопроводности. Сводку таких зависимостей возможно найти в книге [50]. В качестве примера приведем

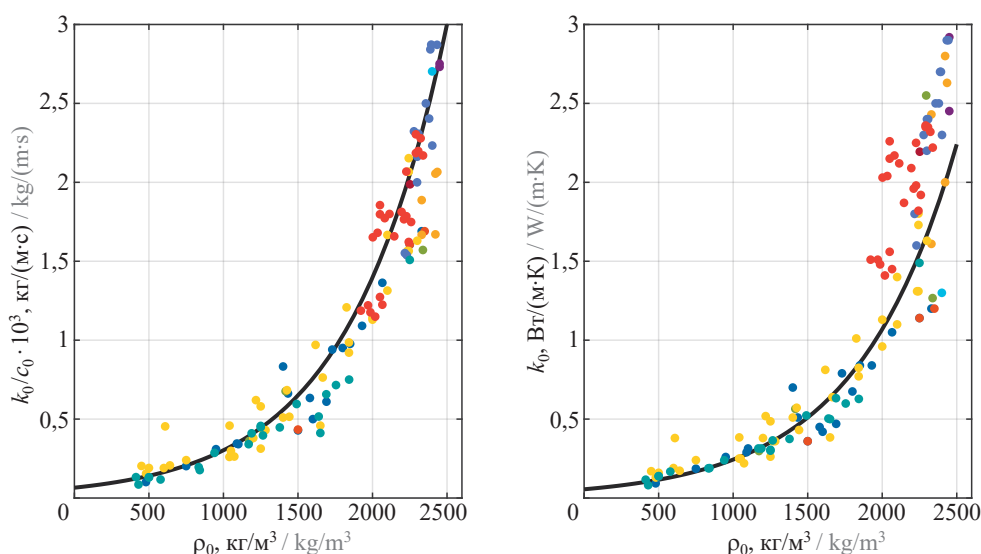


Рис. 3. Кривые регрессии $\rho \rightarrow k_0/c_0$ и $\rho \rightarrow k_0$

Fig. 3. Regression curves $\rho \rightarrow k_0/c_0$ and $\rho \rightarrow k_0$

эмпирическую формулу Некрасова для пористых и сыпучих материалов:

$$k_0 = 1,16\sqrt{0,02 + 0,22(\rho/1000)^2} - 0,16.$$

Для легких бетонов она дает значения k_0 , не слишком сильно отличающиеся от полученных по формуле (3).

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры

С точки зрения решения задачи (2) более важной является зависимость $k(T)$ коэффициента теплопроводности от температуры. Изучению этой зависимости посвящены работы [9, 21–29, 32–35, 37, 43–46, 49].

Известно, что для большинства однородных материалов, таких как воздух, вода, керамика, сталь, коэффициент теплопроводности k увеличивается с ростом температуры. Однако для бетонов тенденция к незначительному возрастанию наблюдается только при температурах ниже 100 °С [26, 32, 51]. Этот начальный участок кривой $k(T)$ мало влияет на поле температуры при пожаре, поэтому он не принимается во внимание ни в одной из известных моделей теплопроводности бетона.

При дальнейшем увеличении температуры начинает играть роль структурная неоднородность бетона. Многочисленные эксперименты по изучению влияния температуры на теплофизические свойства бетона показывают общую для бетонов всех типов тенденцию к снижению коэффициента теплопроводности с ростом температуры. Указанную тенденцию можно объяснить следующими причинами.

Заполнитель и цементный камень по-разному реагируют на повышение температуры. Как правило, цементный камень имеет тенденцию к усадке при возрастании температуры, в то время как заполнители, наоборот, расширяются [51].

Кроме того, в зоне «температурного фронта» из-за высоких градиентов температуры возникают значительные температурные напряжения. Внутренние напряжения вызывают образование микротрещин, что, в свою очередь, препятствует распространению тепла (уменьшается теплопроводность). Еще одним фактором, способствующим снижению теплопроводности бетона при повышении температуры, является высвобождение воды в результате термических реакций в связующем. Дегидратация цементного камня с последующим выпариванием свободной воды приводит к некоторому снижению удельной плотности бетона и, как следствие, к некоторому увеличению его пористости. Давление водяных паров в порах также способствует распространению микротрещин.

Измерения теплопроводности бетона, охлажденного после нагрева до высоких температур, показывают, что исходная теплопроводность материала уже не восстанавливается [30, 32]. Это говорит о том, что снижение коэффициента теплопроводности с увеличением температуры действительно связано с необратимыми процессами, такими как дегидратация и образование микротрещин.

Важно отметить, что описанные механизмы тем заметнее, чем выше плотность бетона. Поэтому особенно заметное снижение теплопроводности характерно для тяжелых бетонов. В особо легких бетонах может наблюдаться даже некоторое увеличение коэффициента теплопроводности с ростом температуры (рис. 4). Таким образом, в бетонах с изначально высокой пористостью эффект роста теплопроводности для однородных материалов и эффект снижения теплопроводности, обусловленный структурной неоднородностью, конкурируют между собой.

На рис. 4 представлены данные о зависимости $k(T)$ для бетонов разных типов, взятые из источ-

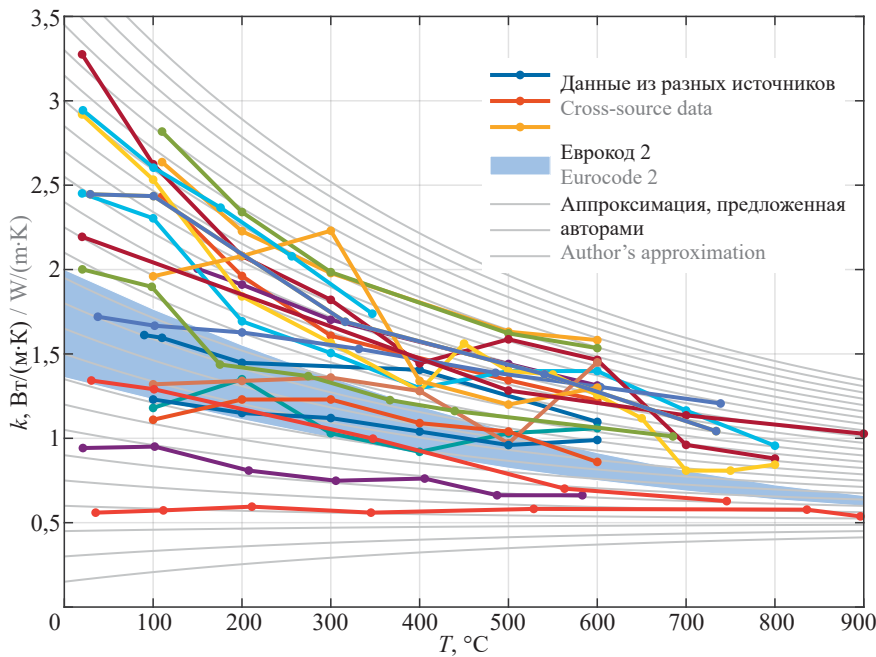


Рис. 4. Зависимость $k(T)$ теплопроводности от температуры для бетонов разных типов и ее аппроксимация
 Fig. 4. The dependence of thermal conductivity $k(T)$ on temperature for different types of concrete and its approximation

ников [9, 20–23, 25–28, 30, 32, 34, 35]. Цветовой заливкой выделен коридор значений, которые стандарт Eurocode 2 рекомендует для оценки теплопроводности нормальных бетонов. Границы коридора задаются формулами (температура T измеряется в °C):

$$k_{up}(T) = 2 - 2,451\left(\frac{T}{1000}\right) + 1,07\left(\frac{T}{1000}\right)^2;$$

$$k_{down}(T) = 1,36 - 1,36\left(\frac{T}{1000}\right) + 0,57(T/1000)^2.$$

Заметим, что в новой редакции Eurocode 2 от 2023 года⁴ предлагается использовать в расчетах «смешанную» зависимость:

$$k(T) = \begin{cases} k_{up}(T), & T < 140 \text{ }^\circ\text{C}, \\ k_{down}(T), & T > 160 \text{ }^\circ\text{C}. \end{cases}$$

Примеры использования этого нового подхода можно найти в труде [52].

Главное наблюдение, которое можно сделать, анализируя рис. 4, состоит в следующем.

Вид кривой $k(T)$ существенным образом зависит от значения k_0 коэффициента теплопроводности при нормальной температуре. Можно считать, что кривые на рис. 4 образуют однопараметрическое семейство $k(k_0, T)$.

Указанная тенденция отмечается многими авторами. В обзоре [32] указывается, что, согласно результатам Бранделла (Brundell), температурная зависимость $k(T)/k_0$ примерно одинакова для разных типов бетонов (сравнивались бетоны с гранитным, извест-

няковым, кварцитным и другими заполнителями). В работе [28] собраны данные из разных источников по теплопроводности стандартных заполнителей — карбонатного, силикатного и базальтового. Для всех заполнителей кривые также почти образуют однопараметрическое семейство. Той же тенденции следует и «коридор» Eurocode 2. В диссертации [53] также обработаны сведения о теплопроводности из нескольких источников и построены верхняя и нижняя границы диапазона изменения теплопроводности нормальных бетонов. Полученные зависимости несколько отличаются от зависимостей Eurocode 2, но имеют тот же характер изменения с ростом температуры. Наконец, систематические теоретические и экспериментальные исследования Хармати [20, 34] дают для нормальных бетонов и легких бетонов границы диапазонов $k(T)$ с тем же характером изменения.

Из рис. 4 можно увидеть также еще одну общую тенденцию: чем больше значение k , тем больше скорость его уменьшения с ростом T ($dk/dT \sim k$). Это подсказывает, что для описания зависимости $k(T)$ можно использовать экспоненциальную формулу с асимптотическим стремлением k к некоторому предельному значению, зависящему от начальной теплопроводности k_0 .

Для построения такой аппроксимации авторы настоящего исследования использовали экспериментальные данные рис. 4 из указанных выше источников, а также имеющиеся в литературе обобщающие зависимости типа Eurocode 2. Подобные зависимости можно найти, например, в Eurocode 2, СП 468.1325800.2019 [3, 24, 32, 42]. Всего рассматривалось примерно 40 экспериментальных и аппроксимационных кривых.

⁴ EN 1992-1-2:2023. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules. Structural fire design. CEN, Brussels, 2023. P. 88.

Аппроксимацию зависимости $k(T)$ искали в виде:

$$k(T) = \alpha + \beta k_0 + ((1 - \beta)k_0 - \alpha) \exp(-\gamma T).$$

Согласно этому выражению, получаем $k(0) = k_0$ и $\lim_{T \rightarrow \infty} k(T) = \alpha + \beta k_0$. Таким образом, предельное значение мы считаем зависящим от k_0 линейно.

Коэффициенты α , β , γ аппроксимации были вычислены МНК, исходя из условия наилучшего совпадения по всему массиву данных. В результате получена следующая формула:

$$k(T) = 0,45 + 0,1k_0 + (0,9k_0 - 0,45)\exp(-2T/1000). \quad (5)$$

На рис. 4 соответствующие кривые семейства $k(k_0, T)$ показаны светло-серыми линиями.

Наряду с МНК использовали также метод минимизации максимальной относительной погрешности. При этом получается немного другая формула:

$$k(T) = 0,3 + 0,1k_0 + (0,9k_0 - 0,3)\exp(-2T/1000). \quad (6)$$

Для аппроксимации (6) максимальная относительная погрешность по всему массиву данных составляет 35 %, что можно считать очень хорошим результатом.

Важным достоинством формулы (5) является ее универсальность: она описывает зависимость $k(T)$ для бетона любого типа при условии, что известен его коэффициент теплопроводности при нормальных условиях k_0 . Если известна только удельная плотность ρ бетона, то приближенное значение k_0 можно принять согласно формуле (3).

В заключение этого раздела скажем несколько слов еще об одном факторе, влияющем на теплопроводность бетона — об эксплуатационной влажности.

Теплопроводность воды примерно в 30 раз выше теплопроводности воздуха и примерно в три раза ниже теплопроводности сухого бетона. При заполнении пор и микротрещин влагой теплопроводность бетона несколько возрастает. Для нормальных и тяжелых бетонов эта зависимость довольно незначительная [22]. Однако для высокопористых (легких) бетонов изменение может быть значительным — до двух раз. В обзоре [15] указывается, что в среднем значение k увеличивается примерно на 6 % при добавлении 1 % влаги по массе (количество влаги, которое может содержать бетон, зависит, прежде всего, от его пористости).

Отметим, что в условиях пожара определяющее влияние на поток тепла, а значит и на скорость прогрева бетона, оказывает теплопроводность приповерхностных слоев, из которых влага быстро испаряется, а коэффициент теплопроводности становится равным коэффициенту теплопроводности сухого бетона. Поэтому влиянием влажности на значение k в расчетах огнестойкости можно пренебречь.

Перейдем к обсуждению второго теплофизического параметра бетона — его удельной теплоемкости.

Удельная теплоемкость и ее зависимость от температуры

Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К), характеризует способность материала аккумулировать тепло и определяет динамику изменения температуры в нестационарных процессах. Чем больше удельная теплоемкость материала (а точнее, произведение $c\rho$), тем медленнее будет расти температура конструкции в условиях пожара.

Различные материалы, применяемые в качестве наполнителей в бетонах, имеют близкие значения удельной теплоемкости [20, 22, 26, 32]. Поэтому от вида и массовой доли заполнителя удельная теплоемкость бетона зависит довольно слабо, в отличие от коэффициента теплопроводности k . *Водоцементное соотношение* ω также не оказывает существенного влияния, поскольку вода, не израсходованная на гидратацию цемента, испаряется при высыхании бетона.

Как показывают эксперименты и аналитические расчеты, удельная плотность и пористость бетона тоже не являются определяющим фактором: килограмм пористого и килограмм плотного бетона обладают близкими теплоемкостями.

Однако некоторая корреляция между плотностью и удельной теплоемкостью все же имеется [13].

Европейский стандарт Eurocode 2 и американский стандарт ACI-122⁵ рекомендуют удельную c_0 теплоемкость при нормальных условиях считать независимой от удельной плотности и принимать:

$$c_0 = 880 + 900 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Российский стандарт СП 468.1325800.2019 дает несколько меньшие значения — $c_0 = 750 - 850$ Дж/(кг·К).

Как и коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость меняется при изменении температуры. Однако тип и состав бетона не так существенно влияют на зависимость $c(T)$, как на зависимость $k(T)$. Это можно видеть, сравнивая рис. 5 и 4. В целом наблюдается тенденция возрастания удельной теплоемкости с ростом температуры.

На рис. 5 собраны экспериментальные данные о зависимости $c(T)$ из источников [20–23, 26, 27, 35] — всего 29 кривых для бетонов разного состава и разной удельной плотности в диапазоне от 1000 до 2500 кг/м³.

Вид экспериментальных кривых рис. 5 показывает, что нет надежных оснований использовать для $c(T)$ аппроксимации сложнее, чем линейная. В большинстве стандартов и расчетных моделей используется именно *линейная аппроксимация* (об аппроксимации Eurocode 2 будет сказано далее отдельно):

$$c(T) = c_0 + \alpha T. \quad (7)$$

⁵ ACI/TMS 122R-14. Guide to thermal properties of concrete and masonry systems. U.S. : ACI, 2014. P. 36.

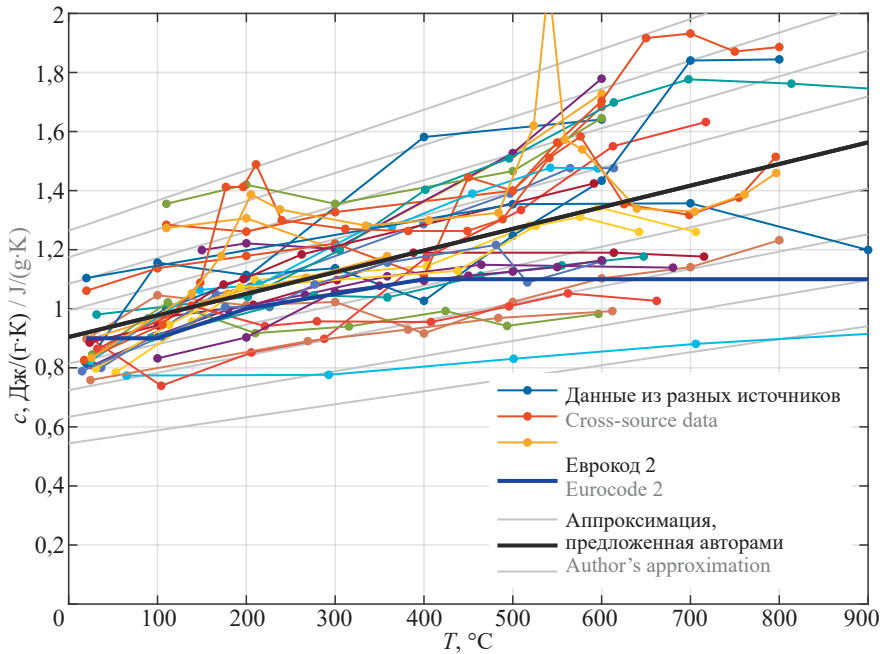


Рис. 5. Зависимость $c(T)$ удельной теплоемкости от температуры для бетонов разных типов и ее аппроксимация
 Fig. 5. The dependence of specific heat capacity $c(T)$ on temperature for different types of concrete and its approximation

Например, в СП 468.1325800.2019 для нормальных и тяжелых бетонов принимается зависимость $c(T) = 0,71 + 0,83(T/1000)$.

Отметим общие тенденции изменения удельной теплоемкости, которые можно увидеть на рис. 5.

Теплоемкость бетонов всех типов увеличивается с ростом температуры. Экспериментальные кривые имеют близкие коэффициенты наклона, при этом можно отметить некоторое увеличение разброса значений при повышении температуры.

Учитывая сказанное, возможно предложить следующий вариант универсальной линейной аппроксимации:

$$c(T) = c_0(1 + \alpha T); \alpha = \text{const}. \quad (8)$$

При помощи МНК определили значение α , обеспечивающее наилучшее согласие аппроксимации (8) с массивом данных рис. 5: $\alpha = 0,81 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Среднее значение c_0 равно $c_0 = 904 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, что согласуется со стандартами [22, 24]. Коэффициент детерминации на всем массиве данных составляет $R^2 = 0,859$.

При использовании для каждой кривой рис. 5 индивидуальной линейной аппроксимации $c_i(T) = c_{0i} + \alpha_i T$ коэффициент детерминации на всем массиве данных получается равным $R^2 = 0,906$, а при использовании универсальной аппроксимации (7) ($\alpha = \text{const}$) имеем $R^2 = 0,840$. Это говорит о том, что универсальная аппроксимация (8) лучше отражает свойства данных рис. 5, чем аппроксимация (7). При этом она обеспечивает среднеквадратическое отклонение, близкое к минимально возможному (при индивидуальной линейной аппроксимации).

На рис. 5 черная жирная прямая соответствует усредненной аппроксимации:

$$c(T) = 900(1 + 0,81(T/100)),$$

серые прямые — это линии из семейства (8) при $c_0 \in [500, 1250] \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Также на рис. 5 представлена кусочно-линейная аппроксимация Eurocode 2 — синяя ломаная. Видно, что формула Eurocode дает значения удельной теплоемкости несколько ниже средних по рассматриваемому массиву данных. Этот факт отмечают и другие авторы, в частности авторы работ [26, 49].

Рис. 6 показывает, насколько универсальная аппроксимация (8) лучше, чем просто усредненная по всем данным рис. 5 линейная зависимость. Кривые на рис. 6 — это нормализованные данные рис. 5. Для каждой кривой $c_i(T)$ при помощи МНК найдено значение коэффициента c_{0i} : $c_i(T) \approx c_{0i}(1 + 0,81(T/1000))$.

Кривые c_i/c_{0i} сравниваются на рис. 6 с единой нормализованной зависимостью $c/c_0 = 1 + 0,81 \times T/1000$ (жирная черная прямая).

Итак, при известном значении c_0 зависимость $c(T)$ аппроксимируется единой для бетонов всех типов формулой:

$$c(T) = c_0(1 + 0,81(T/1000)). \quad (9)$$

Если значение c_0 неизвестно, то следует принимать $c_0 = 900 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Укажем на важное преимущество аппроксимации (9) перед аппроксимацией (6) (с единым коэффициентом наклона). Пусть ρ , k_0 и c_0 — теплофизические характеристики бетона при нормальной температуре. Введем приведенное время (a_0 — температуропроводность бетона при нормальных условиях):

$$\tau = \frac{k_0}{\rho c_0} t = a_0 t.$$

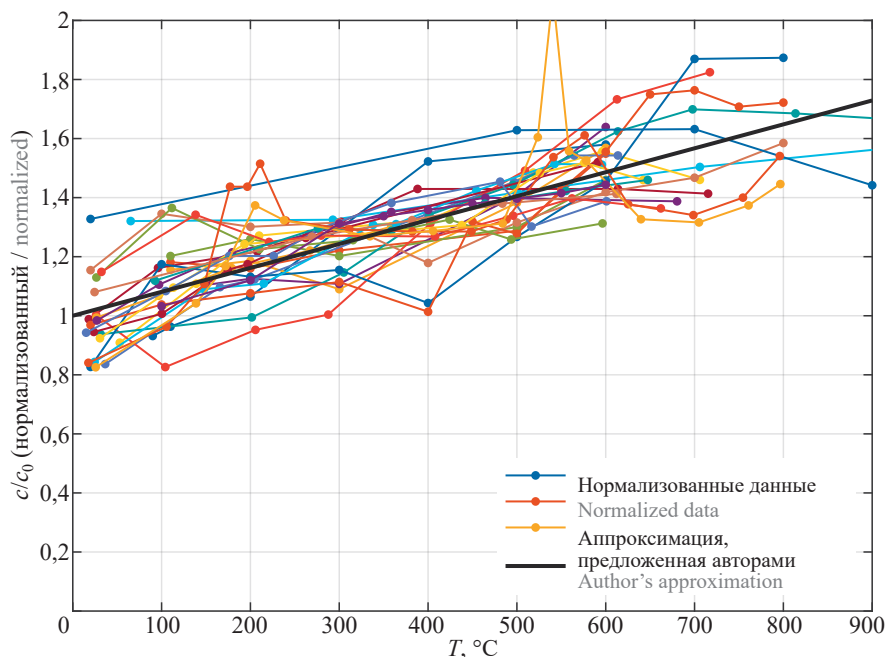


Рис. 6. Нормализованные кривые $c(T)/c_0$ и аппроксимация

Fig. 6. Normalized curves $c(T)/c_0$ and their approximation

Тогда уравнение теплопроводности (2) принимает вид:

$$k_0(1 + \alpha T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

где $\alpha = 0,81 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $k(T) = 0,45 + 0,1k_0 + (0,9k_0 - 0,45)\exp(-2T/1000)$.

В этом уравнении остается только один параметр, зависящий от свойств бетона — коэффициент k_0 . Это упрощение может играть важную роль при исследовании нелинейной задачи (2). Легко понять, что при использовании аппроксимации (6) такое упрощение уже не имеет места.

Влияние влагосодержания и реакций разложения

При нагревании бетона до высоких температур происходит ряд необратимых эндотермических процессов, в результате которых изменяются теплофизические характеристики [21, 26, 29, 32, 34, 42, 52, 54]. Наиболее важными из них являются следующие:

- испарение свободной влаги, содержащейся в порах, при $T \in [100, 130] \text{ }^\circ\text{C}$;
- дегидратация цементного камня с последующим испарением при $T \in [150, 400] \text{ }^\circ\text{C}$;
- разложение гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на оксид и воду при $T \in [450, 600] \text{ }^\circ\text{C}$;
- для бетонов с известняковым заполнителем — декарбонизация известняка при $T \in [600, 800] \text{ }^\circ\text{C}$;
- для керамзитобетонов — разложение керамзита при $T > 800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Более полный список термохимических реакций при нагреве бетона приводится в публикациях [32, 54].

Следует отметить, что подобные процессы конечны во времени. Например, если поддерживать

температуру бетона равной $200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение некоторого времени, то влага в порах полностью испарится (процесс завершится) и далее теплофизические свойства будут соответствовать сухому бетону.

Поэтому пики на приводимых графиках эффективной теплоемкости (рис. 7) соответствуют конкретному режиму нестационарного нагрева образцов.

В процессе быстрого нагрева бетона на эндотермические процессы расходуется некоторое количество теплоты, в результате чего несколько замедляется рост температуры. Чтобы учесть этот эффект, оставаясь при этом в рамках модели теплопроводности (2) (без добавления уравнений массопереноса), можно ввести *эффективную удельную теплоемкость*, которая в соответствующем диапазоне температур будет выше, чем теплоемкость при тех же температурах, но в квазистационарном процессе нагрева. В результате на графиках $c(T)$ появляются упомянутые выше пики.

На рис. 7, а приведены кривые эффективной теплоемкости $c(T)$, рассчитанные теоретически для легких и тяжелых бетонов в работе [55] (синие кривые), а также кривые, полученные в эксперименте [38] для тяжелых бетонов с силикатным и карбонатным заполнителями (красные кривые). Графики на рис. 7, а соответствуют сухому бетону, поэтому заметными являются только пики при температурах разложения гидроксида кальция.

Стандарт Eurocode 2 предлагает модель зависимости $c(T)$, учитывающую исходное влагосодержание φ бетона. «Зуб» на синей ломаной (рис. 7, б) соответствует бетону высокой начальной влажности $\varphi = 0,04$ (4 % воды по массе).

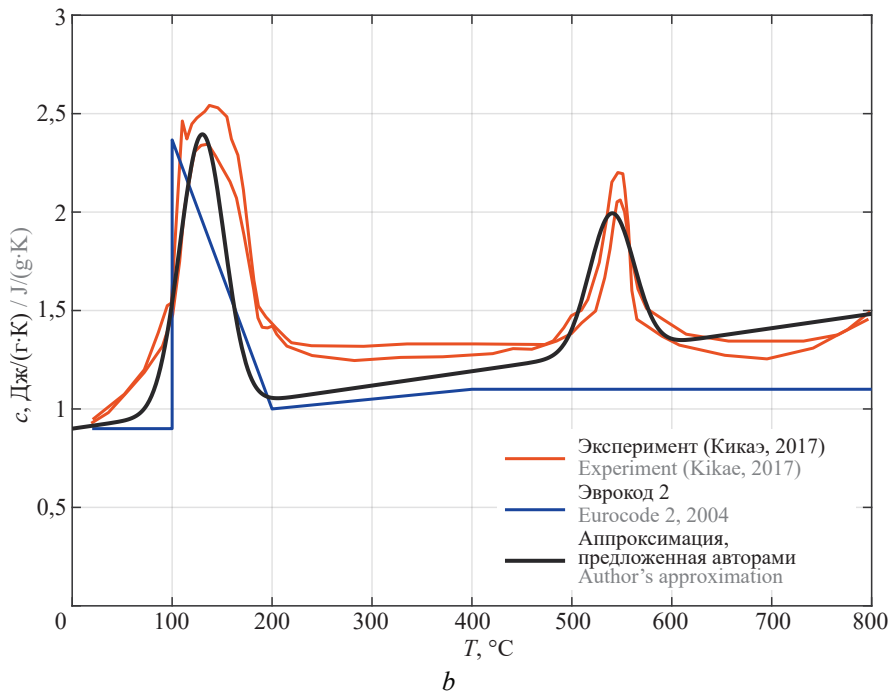
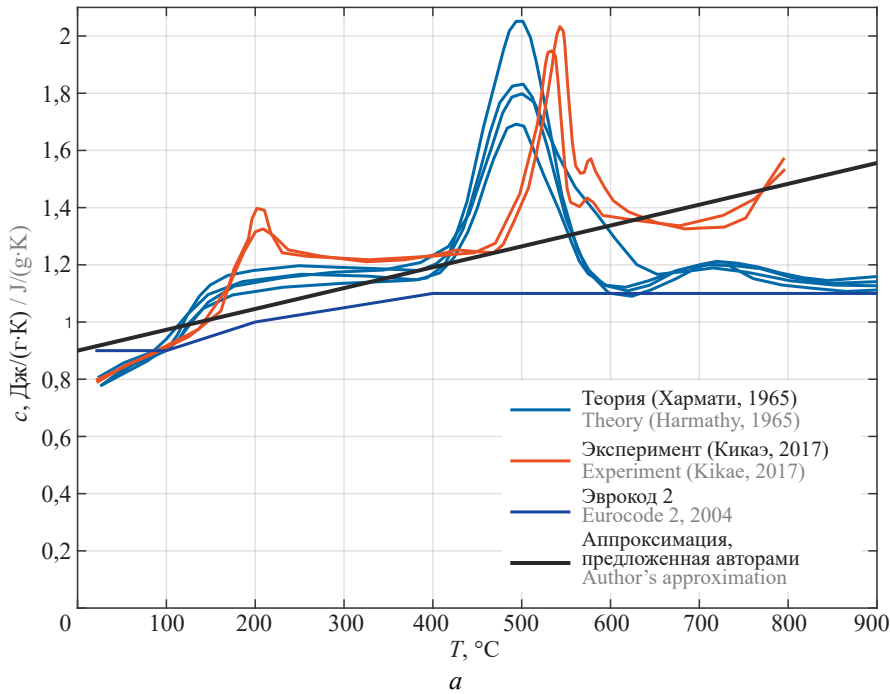


Рис. 7. Кривые эффективной теплоемкости $c(T)$

Fig. 7. Effective specific heat capacity $c(T)$ curves

Аналогичный пик имеется и на экспериментальных кривых [26], и на теоретических кривых [55].

Черной жирной кривой изображена предложенная выше линейная аппроксимация (9), к которой добавлены «пиковые» поправки гауссовского типа:

$$c(T) = c_0(1 + \alpha T) + 0,35\varphi \exp(-0,001(T - 130)^2) + 0,7\exp(-0,001(T - 540)^2). \quad (10)$$

В заключение сделаем важное замечание.

Эндотермические процессы в бетоне забирают часть тепловой энергии, увеличивая эффективную теплоемкость материала и тем самым замедляя прогрев. При оценивании огнестойкости конструкции следует исходить из наихудшего сценария, а значит, разумно вести расчет для сухого бетона без учета реакций разложения.

Зависимость $\rho(T)$ удельной плотности от температуры

В температурных условиях пожара изменяются не только коэффициент теплопроводности k и удель-

ная теплоемкость c , но также и удельная плотность ρ бетона. Вследствие процессов дегидратации, разложения $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и декарбонизации известняка возрастает пористость бетона и, соответственно, уменьшается его удельная плотность [21, 24, 29, 32, 34, 52, 54, 56, 57].

Большинство авторов отмечают, что процессы дегидратации и разложения гидроксида кальция слабо влияют на удельную плотность при температурах до 600 °С. В экспериментах [21] зафиксировано монотонное снижение плотности тяжелого бетона: в диапазоне $T \in [20, 1200]$ °С потеря массы составляет менее 10 %. Такой же по величине эффект дает и аппроксимация Eurocode 2.

Наибольшее изменение удельной плотности происходит у бетонов на известняковом заполнителе при температуре $T > 600$ °С вследствие декарбонизации известняка [24, 32, 52, 54], а также у керамзитобетонов при $T > 800$ °С ввиду диссоциации керамзита [29]. Согласно данным исследования [24], бетоны на известняковых заполнителях могут терять до 25 % массы при нагреве до температур порядка 800 °С.

Несмотря на то что эффект снижения удельной плотности бетонов вполне реален, в модели теплопроводности (2) его можно напрямую не учитывать.

Дело в том, что в уравнение теплопроводности (2) удельная плотность и теплоемкость входят в виде произведения ρc . Поэтому изменение плотности влияет на процесс теплопроводности ровно так же, как и изменение теплоемкости. Однако относительная погрешность, с которой обычно известна зависимость $c(T)$, сравнима с величиной относительного изменения $\rho(T)$ или даже превосходит ее. Отметим также, что всякий эндотермический процесс, сопровождающийся уменьшением удельной плотности, одновременно увеличивает эффективную теплоемкость материала, и в произведении ρc эти эффекты отчасти компенсируют друг друга.

Поэтому допустимо считать, что $\rho = \text{const}$ в процессе нагрева бетона, а некоторое изменение удельной плотности учитывается в зависимости $c(T)$ вида (9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрены закономерности изменения теплофизических параметров бетона при изменении температуры. Обобщены и проанализированы данные о теплофизических свойствах бетонов, которые можно найти в отечественной и иностранной литературе, в том числе в публикациях последних лет. Обработка большого объема экспериментальных и теоретических данных о свойствах бетонов позволила предложить новые универсальные формулы для оценки удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности бетонов различных типов при температурах, характерных для огневого воздействия.

Приведем сводку полученных формул.

Для зависимости $k_0(\rho)$ коэффициента теплопроводности при нормальных условиях от плотности бетона получена аппроксимация:

$$k_0 = 0,0614 \exp(1,435\rho/1000). \quad (\text{A})$$

Для зависимости $k(T)$ коэффициента теплопроводности от температуры получена универсальная формула, в которой параметром является значение k_0 — коэффициент теплопроводности при нормальной температуре:

$$k(T) = 0,45 + 0,1k_0 + (0,9k_0 - 0,45) \exp(-2T/1000). \quad (\text{B})$$

Если теплопроводность бетона неизвестна, то ее следует оценивать по предыдущей формуле (A).

Для зависимости $c(T)$ удельной теплоемкости от температуры получена универсальная аппроксимация:

$$c(T) = c_0(1 + 0,81(T/1000)), \quad (\text{C})$$

где c_0 — удельная теплоемкость при нормальной температуре. Если значение c_0 неизвестно, то следует принимать $c_0 = 900$ Дж/(кг·К).

В условиях, когда о теплофизических параметрах бетона нет никакой информации, вместо формулы (A) лучше применять формулу:

$$\frac{k_0}{c_0} = 6,55 \cdot 10^{-5} \exp\left(\frac{1,53\rho}{1000}\right), \quad (\text{D})$$

поскольку, как показано выше, отношение k_0/c_0 аппроксимируется с более высокой точностью, чем параметры k_0 и c_0 по отдельности. Можно также сразу рассчитывать температуропроводность a_0 бетона при нормальной температуре по формуле:

$$\alpha_0 = \frac{k_0}{c_0\rho} = \frac{6,55 \cdot 10^{-5}}{\rho} \exp(1,53\rho/1000). \quad (\text{E})$$

Важно отметить, что при использовании этих формул уравнение нелинейной теплопроводности удается привести к виду, зависящему всего от одного параметра — коэффициента теплопроводности бетона при нормальной температуре k_0 .

Разработанные аппроксимационные модели позволяют более точно прогнозировать поведение бетона при воздействии высоких температур, что имеет важное практическое значение для проектирования огнестойких конструкций. Полученные зависимости могут быть использованы в инженерных расчетах и нормативных документах, а также для создания новых стандартов и методик оценки огнестойкости.

Перспективы дальнейших исследований

Несмотря на достигнутые успехи, остаются вопросы, требующие дальнейшего изучения. В частности, следует подробнее изучить влияние влажно-

переноса, а также изменение оптических свойств поверхности бетона при нагреве. Эти факторы могут существенно влиять на процесс теплопередачи и требуют дополнительных исследований с использованием численных методов моделирования.

Таким образом, результаты проведенного исследования представляют собой важный шаг на пути

к созданию более точных и надежных моделей оценки огнестойкости бетонных конструкций. Они могут быть полезны как для научного сообщества, так и для практиков в области строительства и проектирования зданий и сооружений, особенно в таких ответственных отраслях, как ядерная энергетика и гражданское строительство.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тамразян А.Г., Мешков В.Р., Геращенко В.С., Гришин А.С. Аппроксимация решения линейной задачи теплопроводности при одностороннем нагреве бетона в условиях стандартного температурного режима пожара // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025. Т. 5. № 1 (111). С. 52–66. DOI: 10.31660/2782-232X-2025-1-52-66. EDN PPUZMN.
2. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 142 с.
3. Lie T.T. Structural fire protection. New York : ASCE, 1992. DOI: 10.1061/9780872628885
4. Фёдоров В.С., Левитский В.Е., Молчадский И.С., Александров А.В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. М. : АСВ, 2009. 408 с. EDN QNOAXN.
5. Hurley M.J. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. NY : Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
6. Wickström U. Temperature calculation in fire safety engineering. Switzerland : Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-30172-3
7. Banerjee D.K. A review of models for heat transfer in steel and concrete members during fire // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2021. Vol. 126. DOI: 10.6028/jres.126.30
8. Soares T.R.L., Farage M.C.R., de Souza Bastos F., Renault N. Parametric analysis of concrete response under high temperatures via a thermo-hydric numerical model // *Mecánica Computacional*. 2019. Vol. XXXVII. Pp. 1973–1982.
9. Millard A., Pimienta P. Modelling of concrete behaviour at high temperature // *RILEM State-of-the-Art Reports*. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-11995-9
10. Kodur V.K.R., Naser M.Z. Structural fire engineering. NY : McGraw-Hill Publication, 2020.
11. Loudon A.G. The thermal properties of lightweight concretes // *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1979. Vol. 1. Issue 2. Pp. 71–85. DOI: 10.1016/0262-5075(79)90013-7
12. Kim K.-H., Jeon S.-E., Kim J.-K., Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete // *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. Issue 3. Pp. 363–371. DOI: 10.1016/s0008-8846(02)00965-1
13. Howlader M.K., Rashid M.H., Mallick D., Haque T. Effects of aggregate types on thermal properties of concrete // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. Vol. 7. Issue 7. Pp. 900–907.
14. Real S., Bogas J.A., Gomes M., Ferrer B. Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete // *Magazine of Concrete Research*. 2016. Vol. 68. Issue 15. Pp. 798–808. DOI: 10.1680/jmacr.15.00424
15. Asadi I., Shafiq P., Hassan Z.F.B.A., Mahyuddin N.B. Thermal conductivity of concrete : a review // *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20. Pp. 81–93. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.07.002
16. Talebi H.R., Kayan B.A., Asadi I., Hassan Z.F.B.A. Investigation of thermal properties of normal weight concrete for different strength classes // *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 2020. Vol. 8. Issue 3. Pp. 908–914.
17. Daza-Badilla L., Gómez R., Díaz-Noriega R., Avudaiappan S., Skrzypkowski K., Saavedra-Flores E.I. et al. Thermal conductivity in concrete samples with natural and synthetic fibers // *Materials*. 2024. Vol. 17. Issue 4. P. 817. DOI: 10.3390/ma17040817
18. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М. : Атомиздат, 1968. 484 с.
19. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. 2-е изд. М., 1969. 144 с.
20. Harmathy T.Z., Allen L.W. Thermal properties of selected masonry unit concretes // *ACI Journal Proceedings*. 1973. Vol. 70. Issue 2. DOI: 10.14359/11193
21. Shin K.-Y., Kim S.-B., Kim J.-H., Chung M., Jung P.-S. Thermo-physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures // *Nuclear Engineering and Design*. 2002. Vol. 212. Issue 1–3. Pp. 233–241. DOI: 10.1016/s0029-5493(01)00487-3
22. Jansson R. Measurement of concrete thermal properties at high temperature // *Fire Design of Concrete Structures: What now? What next? Proceedings from the fib Task Group 4.3 workshop*. 2004.
23. Kodur V.K.R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. Vol. 23. Issue 6. Pp. 793–801. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000225
24. Kodur V. Properties of concrete at elevated temperatures // *ISRN Civil Engineering*. 2014. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2014/468510

25. Голованов В.И., Новиков Н.С., Павлов В.В., Кузнецова Е.В. Прочностные и теплофизические свойства бетона с полипропиленовой фиброй в условиях температурного режима стандартного пожара // *Пожаровзрывобезопасность*. 2017. Т. 26. № 5. С. 37–44. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44. EDN ZAFKSB.
26. Kakae N., Miyamoto K., Momma T., Sawada S., Kumagai H., Ohga Y. et al. Physical and thermal properties of concrete subjected to high temperature // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2017. Vol. 15. Issue 6. Pp. 190–212. DOI: 10.3151/jact.15.190
27. Pan J., Zou R., Jin F. Experimental study on specific heat of concrete at high temperatures and its influence on thermal energy storage // *Energies*. 2016. Vol. 10. Issue 1. P. 33. DOI: 10.3390/en10010033
28. Lucio-Martin T., Roig-Flores M., Izquierdo M., Alonso M.C. Thermal conductivity of concrete at high temperatures for thermal energy storage applications: Experimental analysis // *Solar Energy*. 2021. Vol. 214. Pp. 430–442. DOI: 10.1016/j.solener.2020.12.005
29. Martinez J.E., Rabanal F.P.A., Lazaro M., Alonso-Martinez M., Alvear D., del Coz-Diaz J.J. Assessment of lightweight concrete thermal properties at elevated temperatures // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 21. P. 10023. DOI: 10.3390/app112110023
30. Benjeddou O., Katman H.Y., Jedidi M., Mashaan N. Experimental investigation of the high temperatures effects on self-compacting concrete properties // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 6. P. 729. DOI: 10.3390/buildings12060729
31. Онуфриев С.В., Петухов В.А. Теплофизические свойства бетонов для АЭС. М. : ОИВТ РАН, 2005. 36 с.
32. Naus D.J. A compilation of elevated temperature concrete material property data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures (NUREG/CR-7031). U.S.NRC, 2010.
33. Noh H.G., Lee J.H., Kang H.C., Park H.S. Effective thermal conductivity and diffusivity of containment wall for nuclear power plant OPR1000 // *Nuclear Engineering and Technology*. 2017. Vol. 49. Issue 3. Pp. 459–465. DOI: 10.1016/j.net.2016.10.010
34. Harmathy T.Z. Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures // *Journal of Materials*. 1970. Vol. 5. Issue 1. Pp. 47–74.
35. Collet Y. Étude des propriétés du bétonsoumis à des temperature sélevées entre 200 et 900 °C // *Annales des Travaux Publics de Belgique*. 1977. Issue 4. Pp. 332–338.
36. Khan M.I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models // *Building and Environment*. 2002. Vol. 37. Issue 6. Pp. 607–614. DOI: 10.1016/s0360-1323(01)00061-0
37. Guo Z., Shi X. Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures. US : Elsevier, 2011. DOI: 10.1016/C2010-0-65988-8
38. Варламов А.А. Железобетонные и каменные конструкции: расчет огнестойкости бетонных конструкций : учебное пособие. М. : АСВ, 2014. 128 с.
39. Buchanan A.H., Abu A.K. Structural design for fire safety. 2nd ed. UK: Wiley, 2017. DOI: 10.1002/9781118700402
40. Hertz K. Design of fire-resistant concrete structures. London : ICE, 2019. DOI: 10.1680/dofrcs.64447
41. La Malva K., Hopkin D. International handbook of structural fire engineering // *The Society of Fire Protection Engineers Series*. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-77123-2
42. Schneider U. Concrete at high temperatures : a general review // *Fire Safety Journal*. 1988. Vol. 13. Issue 1. Pp. 55–68. DOI: 10.1016/0379-7112(88)90033-1
43. Inwood M.J. Properties and characteristics of concrete at elevated temperatures // *Concrete '99: Creating in Concrete — Architectural and Engineering Perspective : Proceedings of the Technical Conference and AGM*. 1999. Pp. 89–97.
44. Malik M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V. Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures : a review // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 270. P. 121398. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121398
45. Khushefati W.H., Demirboga R., Farhan K.Z. Assessment of factors impacting thermal conductivity of cementitious composites : a review // *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 5. P. 100127. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100127
46. Rao S., Tadepalli T. High-temperature behaviour of concrete : a review // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. Pp. 167–186. DOI: 10.1007/978-981-99-7464-1_13
47. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов. М. : Гос. изд. лит. по строительству и архитектуре, 1955. 155 с.
48. Loudon A.G., Stacey E.F. The thermal and acoustic properties of lightweight concretes // *Structural Concrete*. 1966. Pp. 58–95.
49. Kizilkanat A.B., Yüzer N., Kabay N. Thermo-physical properties of concrete exposed to high temperature // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 45. Pp. 157–161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.080
50. Грызлов В.С. Структурный подход в оценке теплопроводности легкого бетона : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2020. 156 с.
51. Diederichs U., Jumppanen U.M., Pentalla V. Behavior of high strength concrete at elevated temperatures. Finland : Helsinki University of Technology, 1989.
52. Zehfuß J., Robert F., Spille J., Razafinjato R.N. Evaluation of Eurocode 2 approaches for thermal conductivity of concrete in case of fire // *Civil Engineering Design*. 2020. Vol. 2. Issue 3. Pp. 58–71. DOI: 10.1002/cend.202000001

53. *Khaliq W.* Performance characterization of high performance concretes under fire conditions: thesis. Michigan State University, 2012. 345 p.

54. *Schneider U., Diederichs U., Ehm C.* Effect of temperature on steel and concrete for PCRV's // Nuclear Engineering and Design. 1982. Vol. 67. Issue 2. Pp. 245–258. DOI: 10.1016/0029-5493(82)90144-3

55. *Harmathy T.Z.* The effect of moisture on the fire endurance of building elements // Moisture of Materials in Relation to Fire Tests, ASTM Special Technical Publication. 1965. Pp. 74–95.

56. *Тамразян А.Г.* Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 29–35. EDNTOBVXL.

57. *Tamrazyan A., Avetisyan L.* Comparative Analysis of Analytical and Experimental Results of the Strength of Compressed Reinforced Concrete Columns under Special Combinations of Loads // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. P. 01029. DOI: 10.1051/mateconf/20168601029

Поступила в редакцию 13 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 19 июня 2025 г.

О Б АВТОРАХ: **Ашот Георгиевич Тамразян** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, член-корреспондент РААСН, заслуженный деятель науки Российской Федерации; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0003-0569-4788; tamrazian@mail.ru;

Вадим Ростиславович Мешков — кандидат технических наук, доцент Высшей школы теоретической механики и математической физики; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б; РИНЦ ID: 11655, Scopus: 17435240500, ORCID: 0009-0009-2088-3932; meshkovadim@yandex.ru;

Виталий Сергеевич Геращенко — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; главный технический эксперт; **Атомэнергопроект**; 105005, г. Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1; ORCID: 0009-0003-2701-2167; geraschenko_vs@aep.ru;

Андрей Сергеевич Гришин — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; начальник научно-исследовательского отдела динамики и сейсмостойкости; **Атомэнергопроект**; 105005, г. Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1; ORCID: 0009-0006-3616-0200; grishin_as@aep.ru.

Вклад авторов:

Тамразян А.Г. — научное сопровождение.

Мешков В.Р. — написание статьи.

Геращенко В.С. — сбор и анализ материалов.

Гришин А.С. — научное редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Meshkov V.R., Gerashchenko V.S., Grishin A.S. Approximating the solution of a linear heat transfer problem for concrete subjected to one-sided heating under standard fire conditions. *Architecture, Construction, Transport*. 2025; 5(1):(111):52-66. DOI: 10.31660/2782-232X-2025-1-52-66. EDN PPUZMN. (rus.).

2. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 142. (rus.).

3. Lie T.T. *Structural fire protection*. New York, ASCE, 1992. DOI: 10.1061/9780872628885

4. Fyodorov V.S., Levitskiy V.E., Molchadskiy I.S., Aleksandrov A.V. *Fire resistance and fire hazard of building structures*. Moscow, ASV, 2009; 408. EDN QNOAXN. (rus.).

5. Hurley M.J. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5th ed. NY, Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0

6. Wickström U. *Temperature calculation in fire safety engineering*. Switzerland, Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-30172-3

7. Banerjee D.K. A review of models for heat transfer in steel and concrete members during fire. *Jour-*

nal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 2021; 126. DOI: 10.6028/jres.126.30

8. Soares T.R.L., Farage M.C.R., de Souza Bastos F., Renault N. Parametric analysis of concrete response under high temperatures via a thermo-hydric numerical model. *Mecánica Computacional*. 2019; XXXVII:1973-1982.

9. Millard A., Pimienta P. Modelling of concrete behaviour at high temperature. *RILEM State-of-the-Art Reports*. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-11995-9

10. Kodur V.K.R., Nesar M.Z. *Structural fire engineering*. NY, McGraw-Hill Publication, 2020.

11. Loudon A.G. The thermal properties of lightweight concretes. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1979; 1(2):71-85. DOI: 10.1016/0262-5075(79)90013-7

12. Kim K.-H., Jeon S.-E., Kim J.-K., Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003; 33(3):363-371. DOI: 10.1016/s0008-8846(02)00965-1

13. Howlader M.K., Rashid M.H., Mallick D., Haque T. Effects of aggregate types on thermal properties of concrete. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012; 7(7):900-907.

14. Real S., Bogas J.A., Gomes M., Ferrer B. Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2016; 68(15):798-808. DOI: 10.1680/jmacr.15.00424

15. Asadi I., Shafiq P., Hassan Z.F.B.A., Mahyuddin N.B. Thermal conductivity of concrete : a review. *Journal of Building Engineering*. 2018; 20:81-93. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.07.002

16. Talebi H.R., Kayan B.A., Asadi I., Hassan Z.F.B.A. Investigation of thermal properties of normal weight concrete for different strength classes. *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 2020; 8(3):908-914

17. Daza-Badilla L., Gómez R., Díaz-Noriega R., Avudaiappan S., Skrzypkowski K., Saavedra-Flores E.I. et al. Thermal conductivity in concrete samples with natural and synthetic fibers. *Materials*. 2024; 17(4):817. DOI: 10.3390/ma17040817

18. Chirkin V.S. *Thermophysical properties of nuclear engineering materials*. Moscow, Atomizdat, 1968; 484. (rus.).

19. Franchuk A.U. *Tables of thermal performance indicators of building materials*. Moscow, 1969; 144. (rus.).

20. Harmathy T.Z., Allen L.W. Thermal properties of selected masonry unit concretes. *ACI Journal Proceedings*. 1973; 70(2). DOI: 10.14359/11193

21. Shin K.-Y., Kim S.-B., Kim J.-H., Chung M., Jung P.-S. Thermo-physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures. *Nuclear Engineering and Design*. 2002; 212(1-3):233-241. DOI: 10.1016/s0029-5493(01)00487-3

22. Jansson R. Measurement of concrete thermal properties at high temperature. *Fire Design of Concrete Structures: What now? What next? Proceedings from the fib Task Group 4.3 workshop*. 2004.

23. Kodur V.K.R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011; 23(6):793-801. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000225

24. Kodur V. Properties of concrete at elevated temperatures. *ISRN Civil Engineering*. 2014; 1-15. DOI: 10.1155/2014/468510

25. Golovanov V.I., Novikov N.S., Pavlov V.V., Kuznetsova E.V. Strength and thermo-physical properties of concrete with polypropylene fiber under standard temperature regimes. *Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(5):37-44. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44. EDN ZAFKSB. (rus.).

26. Kakae N., Miyamoto K., Momma T., Sawada S., Kumagai H., Ohga Y. et al. Physical and thermal properties of concrete subjected to high temperature. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2017; 15(6):190-212. DOI: 10.3151/jact.15.190

27. Pan J., Zou R., Jin F. Experimental study on specific heat of concrete at high temperatures and its influence on thermal energy storage. *Energies*. 2016; 10(1):33. DOI: 10.3390/en10010033

28. Lucio-Martin T., Roig-Flores M., Izquierdo M., Alonso M.C. Thermal conductivity of concrete at high temperatures for thermal energy storage applications: Experimental analysis. *Solar Energy*. 2021; 214:430-442. DOI: 10.1016/j.solener.2020.12.005

29. Martinez J.E., Rabanal F.P.A., Lazaro M., Alonso-Martinez M., Alvear D., del Coz-Diaz J.J. Assessment of lightweight concrete thermal properties at elevated temperatures. *Applied Sciences*. 2021; 11(21):10023. DOI: 10.3390/app112110023

30. Benjeddou O., Katman H.Y., Jedidi M., Mashaan N. Experimental investigation of the high temperatures effects on self-compacting concrete properties. *Buildings*. 2022; 12(6):729. DOI: 10.3390/buildings12060729

31. Onufriev S.V., Petukhov V.A. *Thermophysical properties of concretes for nuclear power plants*. Moscow, OIVT RAN, 2005; 36. (rus.).

32. Naus D.J. *A compilation of elevated temperature concrete material property data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures (NUREG/CR-7031)*. U.S.NRC, 2010.

33. Noh H.G., Lee J.H., Kang H.C., Park H.S. Effective thermal conductivity and diffusivity of containment wall for nuclear power plant OPR1000. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017; 49(3):459-465. DOI: 10.1016/j.net.2016.10.010

34. Harmathy T.Z. Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures. *Journal of Materials*. 1970; 5(1):47-74.
35. Collet Y. Étude des propriétés du béton soumis à des températures élevées entre 200 et 900 °C. *Annales des Travaux Publics de Belgique*. 1977; 4:332-338.
36. Khan M.I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. *Building and Environment*. 2002; 37(6):607-614. DOI: 10.1016/s0360-1323(01)00061-0
37. Guo Z., Shi X. *Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures*. US, Elsevier, 2011. DOI: 10.1016/C2010-0-65988-8
38. Varlamov A.A. *Reinforced concrete and masonry structures. Fire resistance calculation of concrete structures : textbook*. Moscow, ASV, 2014; 128. (rus.).
39. Buchanan A.H., Abu A.K. *Structural design for fire safety. 2nd ed.* UK, Wiley, 2017. DOI: 10.1002/9781118700402
40. Hertz K. *Design of fire-resistant concrete structures*. London, ICE, 2019. DOI: 10.1680/dofrcs.64447
41. LaMalva K., Hopkin D. International handbook of structural fire engineering. *The Society of Fire Protection Engineers Series*. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-77123-2
42. Schneider U. Concrete at high temperatures : a general review. *Fire Safety Journal*. 1988; 13(1):55-68. DOI: 10.1016/0379-7112(88)90033-1
43. Inwood M.J. Properties and characteristics of concrete at elevated temperatures. *Concrete '99: Creating in Concrete — Architectural and Engineering Perspective : Proceedings of the Technical Conference and AGM*. 1999; 89-97.
44. Malik M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V. Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures : a review. *Construction and Building Materials*. 2020; 270:121398. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121398
45. Khushefati W.H., Demirboga R., Farhan K.Z. Assessment of factors impacting thermal conductivity of cementitious composites : a review. *Cleaner Materials*. 2022; 5:100127. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100127
46. Rao S., Tadepalli T. High-temperature behaviour of concrete : a review. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 167-186. DOI: 10.1007/978-981-99-7464-1_13
47. Kaufman B.N. *Thermal conductivity of building materials*. Moscow, 1955; 155. (rus.).
48. Loudon A.G., Stacey E.F. The thermal and acoustic properties of lightweight concretes. *Structural Concrete*. 1966; 58-95.
49. Kizilkanat A.B., Yüzer N., Kabay N. Thermo-physical properties of concrete exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*. 2013; 45:157-161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.080
50. Gryzlov V.S. *A structural approach to assessing the thermal conductivity of lightweight concrete : textbook*. Moscow, Infra-Inzheneriya, 2020; 156. (rus.).
51. Diederichs U., Jumppanen U.M., Pentalla V. *Behavior of high strength concrete at elevated temperatures*. Finland, Helsinki University of Technology, 1989.
52. Zehfuß J., Robert F., Spille J., Razafinjato R.N. Evaluation of Eurocode 2 approaches for thermal conductivity of concrete in case of fire. *Civil Engineering Design*. 2020; 2(3):58-71. DOI: 10.1002/cend.202000001
53. Khaliq W. *Performance characterization of high performance concretes under fire conditions : thesis*. Michigan State University, 2012; 345.
54. Schneider U., Diederichs U., Ehm C. Effect of temperature on steel and concrete for PCR V's. *Nuclear Engineering and Design*. 1982; 67(2):245-258. DOI: 10.1016/0029-5493(82)90144-3
55. Harmathy T.Z. The effect of moisture on the fire endurance of building elements. *Moisture of Materials in Relation to Fire Tests, ASTM Special Technical Publication*. 1965; 74-95.
56. Tamrazyan A.G. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading in conditions of fire effect. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 3:29-35. EDN TOBVXL. (rus.).
57. Tamrazyan A., Avetisyan L. Comparative Analysis of Analytical and Experimental Results of the Strength of Compressed Reinforced Concrete Columns under Special Combinations of Loads. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:01029. DOI: 10.1051/mateconf/20168601029

Received March 13, 2025.

Adopted in revised form on June 19, 2025.

Approved for publication on June 19, 2025.

B I O N O T E S : **Ashot G. Tamrazian** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0569-4788; tamrazian@mail.ru;

Vadim R. Meshkov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Theoretical Mechanics and Mathematical Physics; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; build. B, 29 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 11655, Scopus: 17435240500, ORCID: 0009-0009-2088-3932; meshkovadim@yandex.ru;

Vitaliy S. Gerashchenko — postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; chief technical expert; **Atomenergoproekt**; build. 1, 7 Bakuninskaya st., Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-2701-2167; geraschenko_vs@aep.ru;

Andrei S. Grishin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Research Department of Dynamics and Seismic Resistance; **Atomenergoproekt**; build. 1, 7 Bakuninskaya st., Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-3616-0200; grishin_as@aep.ru.

Contribution of the authors:

Ashot G. Tamrazian — scientific support.

Vadim R. Meshkov — writing an article.

Vitaliy S. Gerashchenko — collection and analysis of materials.

Andrei S. Grishin — scientific editing of the article.

The authors declare no relevant conflict of interest.