

В.С. ФЕДОРОВ, В.Е. ЛЕВИТСКИЙ¹¹ Российский университет транспорта, Москва, Россия

СПЕЦИФИКА РЕАКЦИИ БЕТОНА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Аннотация. Данная статья является второй в цикле статей, посвященных обобщению и анализу многочисленных опубликованных материалов по исследованию термомеханических свойств бетона при высокотемпературном воздействии. В этой статье приведен обзор опытных данных, касающиеся исследования свойств бетона при кратковременном нагреве и предпринята попытка анализа и структурирования результатов многочисленных, разноплановых испытаний, касающиеся исследования свойств бетона при кратковременном высокотемпературном нагреве. Рассмотрена физика процесса деформирования бетона при нагреве и его причины. Отражена зависимость получаемых характеристик от условий испытаний. Показаны основные наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на прочностные и деформативные характеристики бетона при нагреве. Развита представления о механизмах термической деструкции и термосилового сопротивления бетона, подтвержденные специальными методами исследования бетона и его компонентов. Приводятся основные причины изменения прочностных и деформативных характеристик бетона при кратковременном высокотемпературном нагреве, при этом акцент сделан на выявление влияющих факторов и степени их влияния, а также на обобщение существующих трактовок деградационных механизмов.

Ключевые слова: бетон, температура, прочность, модуль упругости, деформации, компоненты деформации, связь напряжение-деформации.

V.S. FEDOROV, V.E. LEVITSKY¹¹ Russian University of Transport, Moscow, Russia

SPECIFICITY OF CONCRETE RESPONSE TO HIGH TEMPERATURE

Abstract. This article is the second in a series devoted to summarizing and analyzing numerous published materials on the thermomechanical properties of concrete exposed to high temperatures. This article provides an overview of experimental data related to the study of concrete properties under short-term heating and attempts to analyze and structure the results of numerous, diverse tests related to the study of concrete properties under short-term high-temperature heating. The physics of concrete deformation during heating and its causes are discussed. The dependence of the obtained characteristics on test conditions is demonstrated. The key factors influencing the strength and deformation properties of concrete during heating are highlighted. Concepts regarding the mechanisms of thermal degradation and thermal resistance of concrete are developed, supported by specialized methods for studying concrete and its components. The main causes of changes in the strength and deformation properties of concrete during short-term high-temperature heating are presented, with an emphasis on identifying the influencing factors and their degree of influence, as well as summarizing existing interpretations of degradation mechanisms.

Keywords: concrete, temperature, strength, elastic modulus, deformation, strain components, stress-strain relationship.

1. Введение

За последние шесть с лишним десятилетий накоплен значительный массив опытных данных по влиянию кратковременного высокотемпературного нагрева на механические свойства бетона, полученных для материала различного состава и в различных условиях испытаний [1]. Однако до сих пор отсутствует целостное, физически обоснованное объяснение источников и причин изменения прочностных и деформативных характеристик бетона во всем диапазоне положительных температур, характерных для условий пожара. Эффективные расчётные модели реакции бетона на совместное термосиловое воздействие должны базироваться на чётком определении физических и химических механизмов термической деструкции, выявлении наиболее значимых влияющих факторов, а также на разделении соответствующих компонентов деформаций и их адекватном математическом описании [1,2].

Актуальность данной работы, являющейся второй в цикле статей, посвященных обобщению и анализу исследований термомеханических свойств бетона, обусловлена необходимостью систематизации разрозненных и зачастую противоречивых экспериментальных результатов. Как показывает анализ литературы, реакция бетона на нагрев определяется сложным взаимодействием трёх основных составляющих: цементного камня, заполнителя и контактной зоны между ними. Поведение цементного камня, в свою очередь, существенно зависит от процессов, происходящих в его ключевом структурном компоненте – тоберморитовом геле (C-S-H), и в кристаллическом сростке, а также от миграции влаги [1, 2]. Удаление свободной и физически связанной воды, дегидратация гидратных фаз, фазовые превращения в заполнителях (такие как α - β переход кварца при 573°C) и возникающая термическая несовместимость компонентов приводят к сложной, нелинейной зависимости прочности и деформативности от температуры [3, 4, 5].

Несмотря на обширные экспериментальные исследования, такие как работы Malhotra [6], Anderberg и Thelandersson [3], Schneider [7, 8], ряд фундаментальных вопросов остаётся дискуссионным. В частности, недостаточно изучены физические причины снижения модуля упругости и различного снижения прочности при растяжении по сравнению с прочностью при сжатии [9], а также природа дополнительных деформаций (переходной термической ползучести, или LITS), возникающих при нагреве под нагрузкой [10, 11]. Отсутствует единая интерпретация механизмов, объясняющих, почему предварительное нагружение может влиять на сохранение прочности и модуля упругости [1, 6, 12].

Целью данной статьи является обзор, анализ и структурирование многочисленных опытных данных, касающихся поведения бетона при кратковременном высокотемпературном нагреве.

Такой подход позволит сформировать более ясную физическую картину, необходимую для разработки усовершенствованных и практически применимых моделей поведения бетонных конструкций в условиях пожара.

2. Модели и методы

Бетон является композитным материалом, компоненты которого имеют разные свойства, зависящие от влажности, пористости, вида крупного заполнителя и соотношения компонентов. Поэтому для дальнейшего анализа примем во внимание, что механизм термосилового сопротивления бетона складывается из трёх составляющих: (1) – сопротивление цементного камня; (2) – сопротивление заполнителя; (3) – сопротивление контактного слоя между ними.

Основным структурным компонентом, обычно занимающим в объёме цементного камня около 70-80%, является тоберморитовый гель – гидросиликат кальция $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, или в обозначениях химии цемента C-S-H. Остальные примерно 25% объёма приходятся на кристаллический сросток, не до конца гидратированные зёрна цементного клинкера и поры [1]. Кристаллический сросток образован сросшимися друг с

другом кристаллами гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (портландита), гидроалюминатов кальция, а также гидросульфалюмината и гидросульфферрита кальция.

Тоберморитовый гель, как и природный минерал тоберморит, имеет слоистую структуру, способную адсорбционно связывать значительное количество воды, в том числе проникающей вдоль внутренних плоскостей кристаллов гидросиликатов кальция. В отличие от кристаллического сростка, структура которого образована кристаллизационными (химическими) связями, между кристаллогидратами тоберморитового геля действуют коагуляционные контакты за счёт физических (Ван-дер-Ваальсовых) сил межмолекулярного притяжения, обладающие значительно меньшей прочностью. Особенностью коагуляционных контактов является тиксотропия (способность к обратимому восстановлению связей после разрушения), которая наряду с возможностью сдвига соединённых прослойкой жидкости слоёв друг относительно друга обуславливает способность тоберморитового геля к вязкому течению под нагрузкой.

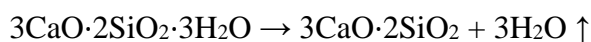
Вследствие перечисленных особенностей строения цементного камня его деформирование под действием приложенного внешнего усилия является вязкоупругим, то есть складывается из упругих деформаций кристаллического сростка и вязких деформаций наполняющего его геля. Вследствие существенно более высокого модуля упругости и прочности кристаллического сростка деформирование цементного камня до того момента, как в сростке начнут появляться микротрещины, оказывается линейным по отношению к приложенной силовой нагрузке и нелинейным по отношению ко времени её действия.

С увеличением возраста бетона часть коагуляционных контактов заменяется кристаллизационными, в результате чего несколько повышается модуль упругости и прочность тоберморитового геля, а вязкие свойства снижаются. Повышение модуля упругости с возрастом пропорционально содержанию цемента в смеси. Наиболее быстро модуль увеличивается в течение первых нескольких месяцев и показывает постоянное увеличение примерно до 3 лет.

Проявление вязких свойств цементного камня значительно усиливается, если его силовое деформирование сопровождается миграцией влаги. Перемещение влаги может происходить как за счёт нагрева, так и восстановления гигрометрического равновесия с окружающей средой. Испарение физически связанной воды (влаги в капиллярах радиусом менее 10^{-7} м) сопровождается процессом усадки, который является обратимым, то есть цементный камень способен также впитывать влагу из атмосферы и восстанавливать свои размеры.

Примечательно также обнаруженное впервые Пикеттом в 1942 году повышение ползучести высыхающего бетона по отношению к аналогичному изолированному от высыхания (эффект Пикетта), причём скорость ползучести возрастает как при удалении влаги, так и при насыщении высушенного бетона влагой, то есть при любом изменении его гигрометрического состояния, и тем в большей степени, чем интенсивнее происходит процесс перемещения влаги [2].

При нагреве последовательность удаления влаги из цементного камня определяется величиной энергии, связывающей воду и твердое вещество: сначала испаряется свободная (несвязанная) вода, затем физически связанная вода (в том числе влага цементного геля), и в последнюю очередь начинается дегидратация – удаление воды, химически связанной с гидратами цемента. Об интенсивности удаления воды с ростом температуры нагрева позволяют судить кривые потери массы образцов [3] (рис. 1), из которых видно, что начальная влажность перестаёт оказывать влияние при температурах свыше 250°C . К кривым потери влажности по форме близка приведенная у Harmathy [13] кривая, показывающая степень дегидратации тоберморитового геля (рис. 2):



Это позволяет полагать, что процесс удаления физически связанной влаги при нагреве происходит в главной степени за счёт гелевой воды, начинается практически с самого начала нагрева и продолжается до температуры 760°C, при которой происходит модификационное превращение геля с уменьшением объёма на 10%. Вследствие слоистой структуры геля его дегидратация сопровождается усадкой и уплотнением, что повышает его прочность.

Интенсивное перемещение влаги на первых этапах нагрева приводит к повышению порового давления, которое складывается с напряжениями от внешней нагрузки и заметно (на 30-35%) снижает прочность цементного камня. На кривой зависимости прочности цементного раствора от температуры [7] (рис. 3) это отражается в виде характерного «провала» в интервале температур 20-200°C.

При дальнейшем росте температуры (200-350°C) прочность восстанавливается и даже может превышать первоначальную (обычно не более чем на 25%) благодаря дополнительной гидратации минералов цементного клинкера – в условиях высокой локальной влажности, температуры и давления инициируется процесс «самозапарки», называемый также внутренним автоклавированием (internal autoclaving) [14]. Степень повышения прочности будет зависеть от минералогического состава цемента, его степени гидратации, соотношения CaO/SiO_2 (или C/S, моль извести на моль кремнезема), количества мелких частиц (кварца или микрокремнезема), достигнутой температуры нагрева и уровня порового давления [15].

При отношении C/S в исходных компонентах около 1,5 и выше при росте температуры от 100 до 200°C образуется слабый гидрат C_2S (также называемый $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$) с уменьшенными силами сцепления (Ван-дер-Ваальса); при отношении C/S менее 1,5 образуется прочный гель тоберморита. При подборе состава бетона важно обеспечить низкое отношение C/S, что достигается добавлением кремнезема в реактивной форме в соответствующих количествах [16].

Дальнейшая потеря гелевой воды к образованию более коротких и прочных силоксановых связей (Si-O-Si) с более высокой поверхностной энергией, тем самым способствуя усадке (уплотнению) и увеличению прочности [17].

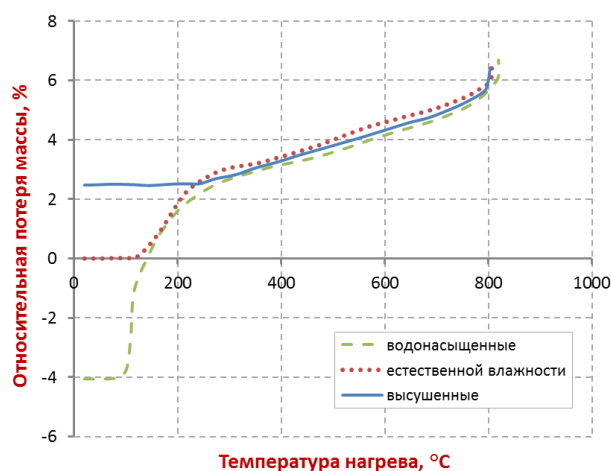


Рисунок 1 – Потеря массы бетонных образцов различной начальной влажности при нагреве (Anderberg, 1976) [3]

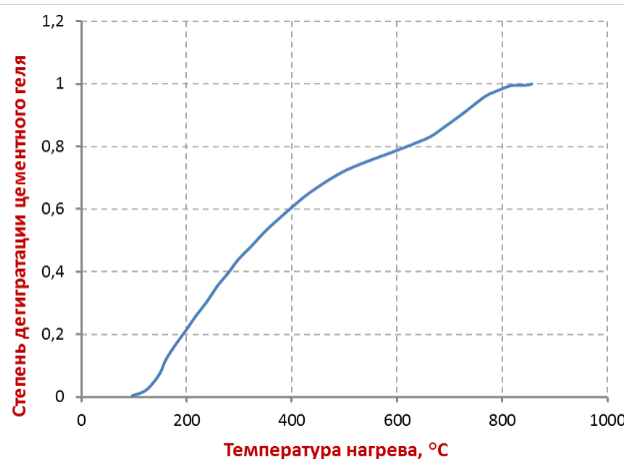
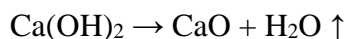


Рисунок 2 – Дегидратация цементного геля с ростом температуры нагрева (Harmathy, 1970) [13]

Исследование микроструктурных изменений нагретого цементного камня методом нейтронографии (neutron diffraction) [17] позволяет определить температуру, при которой происходит дегидратация основных составляющих цементного камня. При нагреве первым разлагается эттрингит – ещё до того, как температура достигнет 100°C.

Дегидратация минералов кристаллического сростка начинает заметно проявляться при нагреве свыше 350°C. Она сопровождается интенсивным развитием повреждений – разрыхлением, образованием трещин и пустот, что приводит к снижению прочности цементного камня. В интервале температур 520...590°C происходит дегидратация алюмината кальция С3А. При 400...600°C происходит дегидратация основного минерала кристаллического сростка – гидроксида кальция (портландита), и наиболее высокая её скорость приходится на 535°C [13, 18]:



Образующаяся в результате этой реакции свободная известь СаО при охлаждении будет гидратироваться атмосферной влагой с увеличением объёма более чем на 40%, что обычно приводит к дальнейшему развивающемуся самопроизвольному разрушению элементов, изготовленных из портландцемента.

В тяжёлом бетоне применяются в основном два вида заполнителей – силикатные (или кремнистые, представленные минералами из горных изверженных пород, содержащих кварц – гранит, кварцит и др.), и карбонатные (из осадочных пород – известняк СаСО₃, магнезит MgСО₃, доломит MgСО₃/СаСО₃, анортозит и др.). Гранитный заполнитель при температурах 200...400°C повышает прочность примерно вдвое из-за снятия внутренних напряжений от неравномерного охлаждения расплавленной магмы. Однако при температуре 573°C происходит модификационное (кристаллическое) превращение кварца со скачкообразным увеличением объёма на 2,4%, что приводит к резкому снижению прочности. Превращение является эндотермическим и обратимым. При 800°C гранит распадается на составляющие (кварц, полевой шпат и слюду) и происходит второе модификационное превращение кварца с увеличением объёма на 12,7%. Температура плавления гранита составляет 1210...1250°C, а базальта – 1050°C, что сопровождается газовыделением и расширением.

Известняковый заполнитель по сравнению с гранитным сохраняет более высокую прочность при нагреве. При 600...700°C начинается частичная диссоциация углекислого кальция, скорость которой зависит от содержания SiO₂ в известняке [19], при 900°C она завершается разрыхлением структуры:



Искусственные заполнители (доменный шлак, керамзит, перлит и др.), применяемые в лёгких бетонах, являются наиболее стойкими к нагреву, так ещё в процессе производства подвергаются значительным термическим воздействиям.

Стойкость заполнителей к нагреву, выражающаяся в отсутствии значительных термических деформаций (в том числе остаточных) и фазовых превращений характеризуется у Г.А. Хюри обобщающим свойством «термическая стабильность заполнителей» (thermal stability of aggregates) [10].

Снижение прочности контактного слоя между цементным камнем и заполнителем вызвано термической несовместимостью между ними: при повышении температуры заполнители расширяются, а цементный камень испытывает усадку (рис. 4). Интенсивность нарушения прочности контактного слоя зависит от способности заполнителей к термическому расширению, от содержания крупного заполнителя (Щ/Ц), его пористости, крупности и характера (шероховатости) поверхности [10]. Наибольшими температурными деформациями обладает щебень из песчаника, гранита и кварцита, наименьшими – щебень из известняка и базальта.

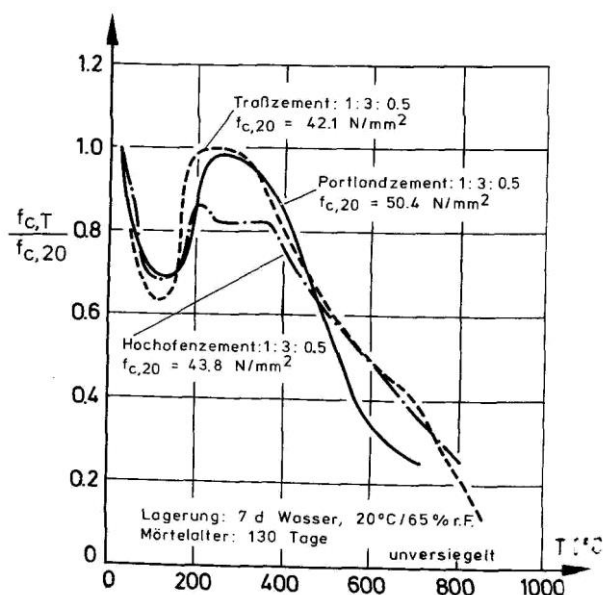


Рисунок 3 – Изменение прочности образцов из цементно-песчаного раствора с ростом температуры (Schneider, 1982) [7]

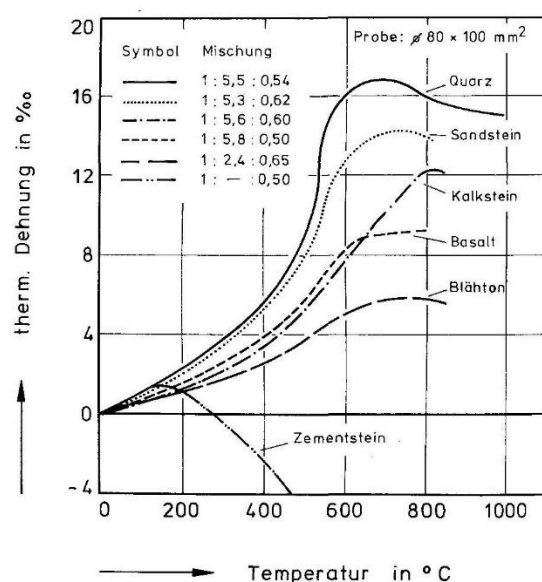


Рисунок 4 – Свободные температурные деформации цементного камня и заполнителей (Schneider, 1982) [7]

3. Результаты исследования и их анализ

Стадии потери прочности бетона повторяют особенности поведения цементного камня [20]: (1) – начальная стадия потери прочности; (2) – стадия стабилизации и восстановления – от 100-250 °C до 400-450°C (характерна как для бетона нормальной массы, так и легкого бетона); (3) – стадия постоянной потери прочности. Для высокопрочного бетона сохраняются те же тенденции, что и для бетона нормальной прочности, однако потеря прочности в диапазоне от 20 до 450 °C заметно выше [20].

Основные причины снижения прочности бетона: (1) – термическая деструкция заполнителя; (2) – ослабление сцепления цементного камня с заполнителем; (3) – разупрочнение цементного камня за счет увеличения пористости при обезвоживании.

Факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на снижение прочности бетона, являются: (1) – тип заполнителя; (2) – его количественное содержание; (3) – наличие приложенной нагрузки. Впервые это наглядно продемонстрировал в 1956 году в своём экспериментальном исследовании Malhotra H.L. [6], рис. 5. Чем более термически стабилен заполнитель и чем больше его относительное содержание в бетоне, тем меньше снижение прочности.

Решающая роль заполнителя вполне ожидаема, так как заполнитель занимает 60-75% объёма бетона. Влияние вида заполнителя во многом объясняется устойчивостью свойств контактного слоя вследствие уменьшения разности температурных деформаций цементного камня и заполнителя: чем меньше температурное расширение заполнителя, тем медленнее снижается прочность. Бетон на гранитном заполнителе при нагреве снижает прочность более сильно, чем бетон с известняковым заполнителем и легким заполнителем. В отношении влияния количественного содержания заполнителя можно предположить, что при увеличении содержания заполнитель как более жёсткий компонент воспринимает более значительную долю напряжений от внешнего усилия, разгружая тем самым цементный камень. Образцы, нагревавшиеся под нагрузкой, показывают меньшее снижение прочности (этот эффект будет обсуждаться ниже).

Влияние на прочность бетона остальных факторов, как показали последующие исследования [8,21,22], оказывается не столь значительным. В числе этих факторов: (1) – исходная прочность бетона, если речь идёт о бетонах нормальной прочности; (2) – тип цемента; (3) – водоцементное отношение В/Ц; (4) – максимальная крупность заполнителя; (5) – скорость нагрева или время изотермической выдержки (наибольшая часть потери прочности

происходила в первые 2 часа); (6) – возраст бетона, если речь идёт о возрасте адекватного отверждения.

Прочность бетона при растяжении в условиях нагрева долгое время не являлась предметом столь пристального исследования, как прочность при сжатии, поскольку не имеет решающего значения для прогноза прочности сечений. Однако к настоящему времени накоплен уже достаточно большой объём данных о снижении прочности при растяжении, которые подробно рассмотрены в обзоре Van der Merwe [9].

В качестве наиболее важных закономерностей можно назвать следующие: (1) – прочность на растяжение при нагреве снижается более сильно, чем прочность на сжатие того же бетона; (2) – прочность на растяжение снижается примерно линейно в интервале температур от 20 до 600°C; (3) – прочность на растяжение оказывается более чувствительной к влиянию содержания влаги. Тип заполнителя и его количественное содержание влияют на прочность при растяжении так же существенно, как и на прочность при сжатии.

В отличие от прочности на сжатие, которая может сохраняться или даже превышать первоначальную в интервале температур до 350°C, все виды бетонов показывают быструю потерю модуля упругости уже с самого начала нагрева (рис. 6). График снижения модуля упругости бетона представляет собой плавно ниспадающую линию, без скачков и площадок, характерных для кривой снижения прочности.

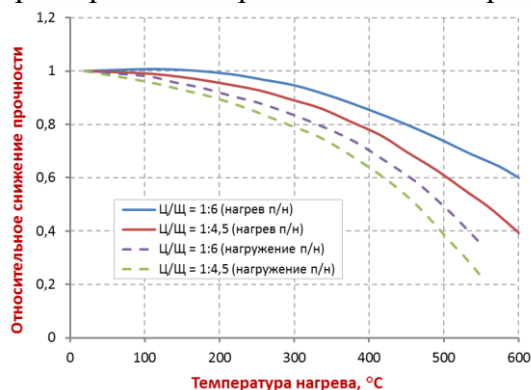


Рисунок 5 – Влияние количественного содержания заполнителя и наличия приложенной нагрузки на снижение прочности бетона при нагреве (Malhotra, 1956) [6]

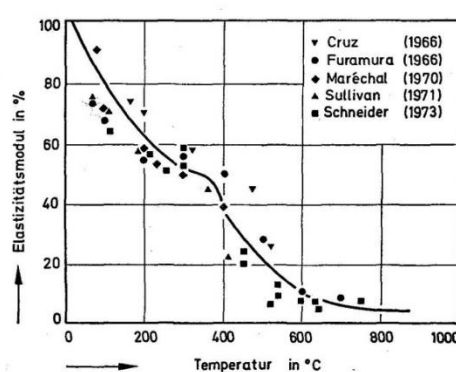


Рисунок 6 – Снижение модуля упругости бетона при нагреве (Schneider, 1982) [7]

В то время как причины снижения прочности бетона при нагреве исследованы и описаны достаточно хорошо, столь же убедительного изложения причин, по которым снижается модуль упругости, в доступной литературе найти не удалось.

Анализируя форму кривой снижения модуля упругости бетона с ростом температуры, можно предположить, что решающее влияние здесь оказывает удаление воды, поскольку график хотя и не полностью, но во многом повторяет кривые обезвоживания цементного геля (см. рис. 2). Связь модуля упругости с содержанием влаги в бетоне подтверждает также тот факт, что при нормальной температуре влажные образцы имеют более высокие значения модуля, чем более сухие.

Модуль упругости бетона может быть определён как аддитивная функция модулей упругости составляющих его компонентов, которые складываются пропорционально занимаемому объёму. В итоге модуль упругости бетона повышается с увеличением жёсткости заполнителя и содержания цемента (уменьшения В/Ц).

Основные факторы, влияющие на снижение модуля упругости бетона остаются теми же, что и для прочности на сжатие – это тип заполнителя, его количественное содержание и наличие приложенной нагрузки. Известняковый бетон имеет меньшие потери модуля упругости, чем бетон на кремнистом заполнителе, а у легкого бетона жесткость не снижается так сильно, как у бетона нормального веса. Прочие факторы (исходная прочность бетона,

водоцементное отношение В/Ц, тип цемента, скорость нагрева, продолжительность выдержки, возраст при испытании) существенного влияния не оказывают [5].

Обобщённой характеристикой прочностных и деформативных свойств бетона является диаграмма «напряжения-деформации». В доступных источниках имеется достаточно ограниченное количество экспериментальных кривых «напряжения-деформации» при нагреве: Furumura [23], Anderberg [3], Schneider [7, 8], Purkiss [12, 24], Khouri [25].

Кроме прочности и начального модуля анализ диаграмм позволяет оценить такие важные параметры как кривизна ветвей и пиковые деформации (деформации в вершине). Здесь опять оказывают влияние вид и содержание заполнителя: чем сильнее снижается прочность при той же температуре, тем сильнее кривизна нисходящей и восходящей ветвей.

Полностью судить об упругих свойствах бетона позволяют лишь деформации на ветвях разгрузки, но таких диаграмм при нагреве, кроме представленных Furumura [23], в доступной литературе пока нет.

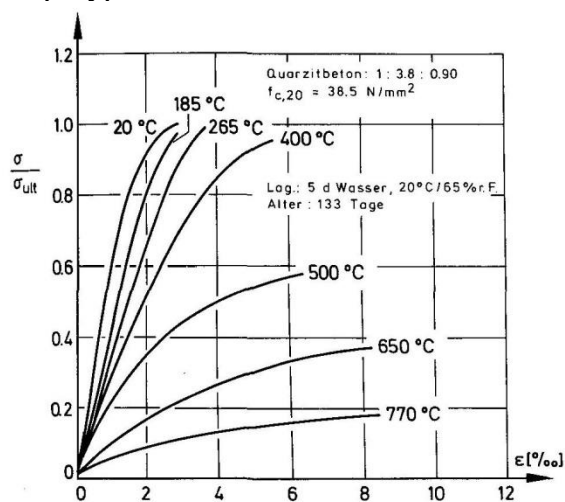


Рисунок 7 – Диаграммы «напряжения-деформации» бетона, нагружение после нагрева, постоянная скорость роста напряжений (Anderberg, 1976) [3]

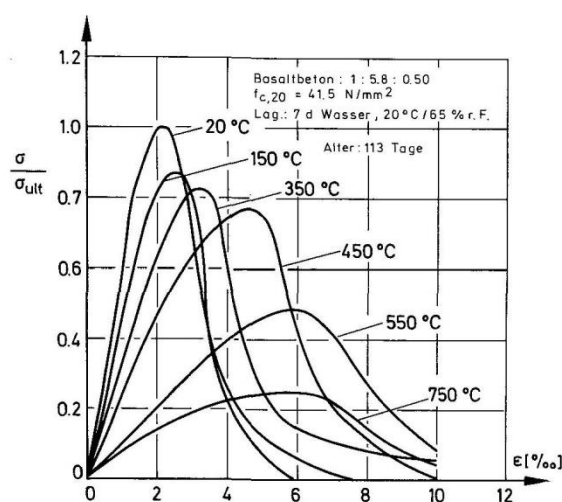


Рисунок 8 – Диаграммы «напряжения-деформации» бетона, нагружение после нагрева, постоянная скорость роста деформаций (Schneider, 1982) [7]

Свободные температурные деформации экспериментально определяются как деформации ненагруженного бетона во время первого нагрева. Последующее охлаждение бетона позволяет выделить в структуре этих деформаций обратимый компонент (рис. 9). Он включает в себя как тепловое расширение, так и увеличение объёма вследствие модификационных превращений кристаллической решётки, и в общем случае меняется нелинейно по отношению к температуре и скачкообразно.

Оставшийся необратимый после охлаждения компонент представлен деформациями усадки, которые можно выделить лишь теоретически с помощью эффективного напряжения [26] и деформациями, возникшими вследствие термохимического повреждения структуры в процессе нагрева (рис. 10). Таким образом, свободные температурные деформации бетона отражают закономерности не только теплового расширения компонентов, но также испарения влаги и снижения прочности бетона, однако практически установить эту связь и применять в практическом моделировании пока по-прежнему затруднительно.

При нагреве, как уже отмечалось, заполнители расширяются, а цементный камень даёт усадку. Поскольку заполнитель составляет большую часть объёма бетона, он в первую очередь влияет на результирующие деформации: чем больше расширяется заполнитель, тем больше расширяется и бетон. Термическое расширение бетона на силикатном заполнителе больше, чем у известнякового бетона. Базальт из-за своей мелкокристаллической структуры имеет меньшее расширение, чем гранитный заполнитель. Наименьшие значения температурных деформаций у бетона на лёгких (мягких) заполнителях.

Поскольку цементный камень на начальных этапах нагрева также демонстрирует расширение, начальное содержание влаги в этом интервале температур также оказывает влияние и бетон с более высокой начальной влажностью показывает большее расширение.

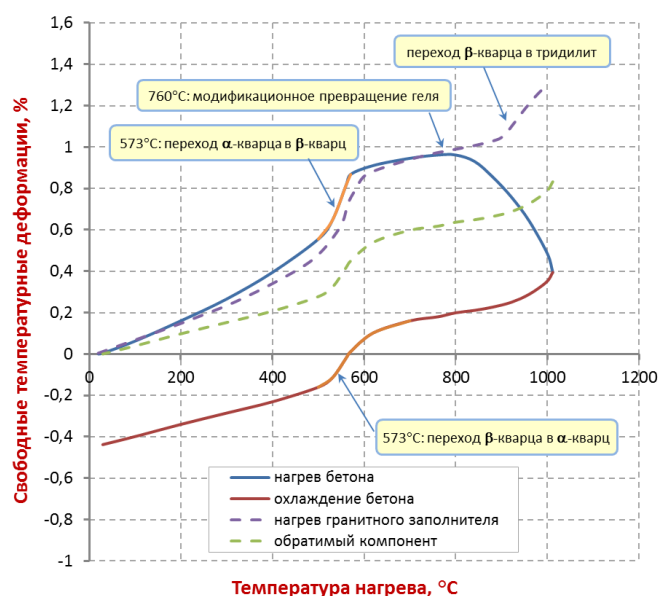


Рисунок 9 – Связь свободных температурных деформаций бетона с модификационными превращениями гранитного заполнителя [11]

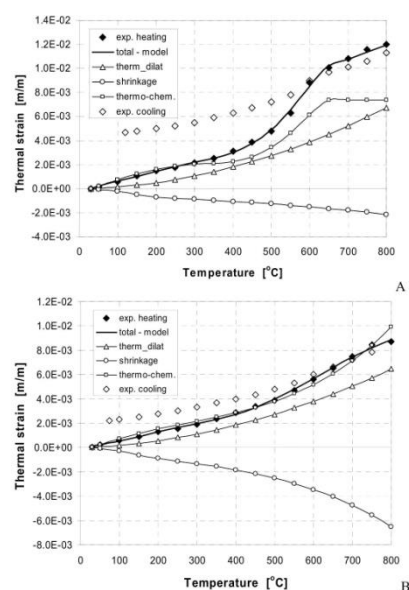


Рисунок 10 – Разделение компонентов свободных температурных деформаций бетона (Gawin, 2004) [26]

Практически все экспериментальные исследования показали, что прочность бетона, нагретого под нагрузкой, выше или равна прочности бетона, нагретого без нагрузки. Это объясняется как минимум двумя причинами: (1) – под действием приложенной до нагрева нагрузки образуются направленные трещины, облегчающие миграцию влаги, что препятствует повышению порового давления; (2) – приложенное сжимающее напряжение уменьшает негативное влияние термической несовместимости между заполнителем и матрицей цементного камня, препятствуя деформациям теплового расширения заполнителей, что снижает общую поврежденность бетона при нагреве [24]. Гипотеза подтверждается также измерением плотности остаточных трещин после охлаждения образцов [12].

Однако в объяснении причин повышения деформативности при нагреве нагруженного бетона среди исследователей не сложилось столь единого мнения. Во многом причиной тому стало определение Хюри [25], который назвал всю силовую деформацию, возникающую в бетоне с самого начала нагрева, Load-Induced-Thermal-Strain (LITS), включив в это понятие не только компонент, который проявляется у бетона, нагретого без нагрузки, но также и переходный компонент, характерный для нагрева нагруженного бетона. В итоге, пытаясь объяснить «происхождение LITS», авторы рассматривают взаимодействие различных механизмов, таких как перенос влаги и развитие повреждений, но в результате не складывается общепринятое и непротиворечивое изложение возможных источников переходного компонента.

Наиболее убедительная гипотеза дана в исследовании Bažant и Chern [27], которые впервые предположили, что переходная тепловая ползучесть (или LITS) вызвана микродиффузией влаги, которая перемещается из микропор в макропоры, удаляет часть твердого материала, создавая микроповреждения.

Термин «микроповреждения» здесь следует применять с особой осторожностью, поскольку вполне очевидно, что любое повреждение структуры должно приводить к снижению прочности материала. Однако при нагреве бетона в нагруженном состоянии, как

отмечалось выше, его прочность обычно не показывает более сильного снижения, чем при нагреве без нагрузки.

В то же время, если не пытаться объяснить «происхождение LITS» в целом, а сфокусировать внимание на объяснении природы только переходного компонента, физическая картина выстраивается вполне реалистично. Переходный компонент деформации, который добавляется к силовой деформации бетона при нагреве в нагруженном состоянии, аналогичен «ползучести при высыхании» – дополнительному компоненту, возникающему за счёт переноса влаги в бетоне. Он имеет с «ползучестью при высыхании» общую природу, состоящую в превращении гелевой воды в поровую, благодаря чему упрощается скольжение слоёв геля при действии нагрузки, поэтому его вполне можно называть ползучестью.

Однако в сложившихся представлениях ползучесть – это эффект, который проявляется во времени. В случае высыхания дополнительный прирост деформации ползучести зависит от количества мигрировавшей влаги, а скорость ползучести – от скорости её переноса, зависящей от разности потенциалов влажности и размеров образца. Здесь управляющим фактором является время. В случае нестационарного нагрева процесс происходит точно так же, но управляющим фактором является температура. Поэтому деформации переходной термической ползучести оказываются не зависящими от времени; количество перенесённой влаги определяется только температурой, если оставаться в диапазоне скоростей и интервалов выдержки при кратковременном нагреве.

Что же касается развития повреждений, то этот процесс происходит в структуре бетона как при нагреве под нагрузкой, так и при нагружении после нагрева, и его следует рассматривать в контексте изменения прочности.

Интересным остаётся также вопрос о том, как влияет нагрев в нагруженном состоянии на модуль упругости бетона, то есть на величину деформаций, являющихся обратимыми при достигнутой температуре после разгрузки. Несмотря на то, что прочность бетона, нагревавшегося в нагруженном состоянии, исследуется с 1956 года, диаграммы «напряжения-деформации», полученные после разгрузки нагретого бетона и последующего нагружения, приводятся всего в трёх источниках [8, 12, 25].

Имеющиеся на данный момент опытные данные позволяют утверждать, что нагрев в условиях приложенной нагрузки значительно повышает модуль упругости; он практически перестаёт снижаться с ростом температуры. Однако уровень нагружения оказывает влияние здесь только до тех пор, пока меняется от нуля до 30%, далее его влияние незначительно. Имеющийся набор опытных данных недостаточен для широких обобщений, но понимать объяснение причин, по которым упругие свойства нагретого под нагрузкой бетона практически не снижаются, в любом случае было бы интересно. При формулировании рабочей гипотезы будем придерживаться концепции совместного деформирования тоберморитового геля и кристаллического сростка в цементном камне как композиционном материале, и тогда повышение модуля упругости объясняется вполне легко. При нагреве без нагрузки часть деформаций сдвига слоёв тоберморитового геля реализовалась, а часть осталась, и гель участвует в восприятии нагрузки, снижая упругие свойства цементного камня. При нагреве под нагрузкой все деформации сдвига тоберморитового геля, какие только возможны при достигнутой температуре, реализовались, и он перестаёт участвовать в восприятии нагрузки. Все усилия воспринимаются теперь упругим и более жёстким каркасом кристаллического сростка. По-видимому, именно по этой причине модуль упругости бетона оказывается практически равен начальному до нагрева, а возможно, в некоторой незначительной степени даже превосходит его.

4. Заключение

1. Анализ показал, что результаты испытаний, полученные по различным методикам, необходимо различать. Важнейшим требованием при выборе методики испытания должно являться создание условий, наиболее близко соответствующих реальной работе бетона в конструкциях при пожаре.

2. Проведённый анализ проявлений реакции бетона на термосиловое воздействие показал, что в её основе лежат два принципиально различных механизма: термомеханический, состоящий в повреждении структуры и снижения прочности материала, и термовлажностный, состоящий в изменении деформативных свойств материала вследствие испарения влаги из тоберморитового геля цементного камня. Если различать вклад каждого из этих механизмов при объяснении происходящих процессов, удаётся получить вполне реалистичную физическую картину сопротивления бетона совместному действию кратковременного нагрева и механического нагружения.

3. Понимание реакции бетона на термосиловое воздействие является основой построения расчётной модели, в которой в виде мотивированно сформулированных предпосылок должно быть учтено действие каждого из выявленных механизмов и определены характеризующие их количественные параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
2. Bazant Z.P., Xi Y. Drying Creep of Concrete: Constitutive Model and New Experiments Separating Its Mechanisms // *Materials and Structures*. 1994. Vol. 27. pp. 3-14.
3. Anderberg Y., Thelandersson S. Stress and Deformation Characteristics of Concrete: Part 2 - Experimental Investigation and Material Behavior Model. Bulletin 54. Lund Institute of Technology, Sweden. 1976. 85 p.
4. 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*. 2021. 270.121398.
5. Hager I. Behaviour of Cement Concrete at High Temperature // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2013. Vol. 61. No. 1. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013
6. Malhotra H.L. The Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete // *Magazine of Concrete Research*. 1956. Vol. 8. No. 3. pp. 85-94.
7. Schneider U. Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen (Behaviour of Concrete at High Temperatures). Heft 337 des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton. Wilhelm Ernst & Sohn, Munich, Germany, 1982.
8. Schneider U. Concrete at High Temperatures – a General Review // *Fire Safety Journal*. 1988. No. 13. pp. 55-68.
9. Van der Merwe J.E. Evaluation of Concrete Tensile Strength as a Function of Temperature // *Construction and Building Materials*. 2022. No. 329. 127179.
10. Khoury G.A. Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: a Reassessment // *Magazine of Concrete Research*. 1992. Vol. 44. No. 161. pp. 291–309.
11. fib Bulletins No. 38: Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling. State-of-art Report. 2007. 105 p.
12. Purkiss J.A., Long-Yuan Li. Fire Safety Engineering Design of Structures. 2013. CRC Press Publ., 3rd edition. 442 p.
13. Harmathy T.Z. Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures // *Journal of Materials*. 1970. No. 5. Pp. 47-74.
14. Verbeck G., Copeland L.E. Some Physical and Chemical Aspects of High Pressure Steam Curing / Menzel Symposium on High Pressure Steam Curing. ACI SP-32. 1972. pp. 1-131.
15. Piasta J. Heat Deformation of Cement Phases and Microstructure of Cement Paste // *Materials and Structures*. 1989. Vol. 17. No. 102. pp. 415-420.
16. Kottas R., Seeberger J., Hisdorf H. Strength characteristics of concrete in the temperature range 20°C to 200°C / Paper H1/2. 5th SMIRT Int. Conference, Berlin, 1979.
17. Castellote M., Alonso C., Andrade C., Turrillasa X., Campoc J. Composition and Microstructural Changes of Cement Pastes Upon Heating, as Studied by Neutron Diffraction // *Cement and Concrete Research*. 2004. No. 34. pp. 1633-1644.
18. Quon D.H.H. Phase Changes in Concrete Exposed to Sustained High Temperatures / Division Report MRP/MSL 80-111(TR), Mineral Sciences Laboratories, CAANMET. Ottawa, Canada, 1980.
19. Harmathy T.Z., Allen L.W. Thermal Properties of Selected Masonry Unit Concretes // *Journal of American Concrete Institute*. 1973. No. 70. Pp. 132–142.

20. Phan L.T. Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the Art / NISTIR 5934. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. 1996. 105 p.
21. Schneider U. Properties of Materials at High Temperatures – Concrete / RILEM Committee 44-PHT. Kassel Universität, Germany. 1985.
22. Fire Design of Concrete Structures – In Accordance With CEB/FIP Model Code 90 / Comité Euro International Du Beton. CEB Bulletin D'Information No. 208. Switzerland, July 1991.
23. Furamura F. Stress-strain Curve of Concrete at High Temperatures // Transactions of the Architectural Institute of Japan, Abstract No 7004. 1966. p. 686.
24. Purkiss J.A., Bali A. The transient behaviour of concrete at temperature up to 800°C / Proceedings of the 10th Ibausil, Section 2/1. Hochschule fur Architektur und Bauwesen, Weimar. 1988. pp. 234–239.
25. Khoury G.A. Majorana C.E., Pesavento F., Schrefler B.A. Modelling of heated concrete // Magazine of Concrete Research. 2002. Vol. 54. No. 2. pp. 77-101.
26. Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A. Modelling of deformations of high strength concrete at elevated temperatures // Materials and Structures. 2004. Vol. 37. No. 268. pp. 218-236.
27. Bažant Z.P., Chern J.C. Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism // Materials and Structures. 1985. Vol. 18. No.103. pp. 1-20.

REFERENCES

1. Sheykin A.Ye., Chekhovskiy Yu.V., Brusser M.I. Struktura i svoystva tsementnykh betonov (Structure and properties of cement concrete). – M.: Stroyizdat, 1979. – 344 s.
2. Bazant Z.P., Xi Y. Drying Creep of Concrete: Constitutive Model and New Experiments Separating Its Mechanisms // *Materials and Structures*. 1994. Vol. 27. pp. 3-14.
3. Anderberg Y., Thelandersson S. Stress and Deformation Characteristics of Concrete: Part 2 - Experimental Investigation and Material Behavior Model. Bulletin 54. Lund Institute of Technology, Sweden. 1976. 85 p.
4. 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*. 2021. 270.121398.
5. Hager I. Behaviour of Cement Concrete at High Temperature // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2013. Vol. 61. No. 1. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013
6. Malhotra H.L. The Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete // *Magazine of Concrete Research*. 1956. Vol. 8. No. 3. pp. 85-94.
7. Schneider U. Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen (Behaviour of Concrete at High Temperatures). Heft 337 des Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton. Wilhelm Ernst & Sohn, Munich, Germany, 1982.
8. Schneider U. Concrete at High Temperatures – a General Review // *Fire Safety Journal*. 1988. No. 13. pp. 55-68.
9. Van der Merwe J.E. Evaluation of Concrete Tensile Strength as a Function of Temperature // *Construction and Building Materials*. 2022. No. 329. 127179.
10. Khoury G.A. Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: a Reassessment // *Magazine of Concrete Research*. 1992. Vol. 44. No. 161. pp. 291–309.
11. fib Bulletins No. 38: Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling. State-of-art Report. 2007. 105 p.
12. Purkiss J.A., Long-Yuan Li. Fire Safety Engineering Design of Structures. 2013. CRC Press Publ., 3rd edition. 442 p.
13. Harmathy T.Z. Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures // *Journal of Materials*. 1970. No. 5. Pp. 47-74.
14. Verbeck G., Copeland L.E. Some Physical and Chemical Aspects of High Pressure Steam Curing / Menzel Symposium on High Pressure Steam Curing. ACI SP-32. 1972. pp. 1-131.
15. Piasta J. Heat Deformation of Cement Phases and Microstructure of Cement Paste // *Materials and Structures*. 1989. Vol. 17. No. 102. pp. 415-420.
16. Kottas R., Seeberger J., Hisdorf H. Strength characteristics of concrete in the temperature range 20°C to 200°C / Paper H1/2. 5th SMIRT Int. Conference, Berlin, 1979.
17. Castellote M., Alonso C., Andrade C., Turrillasa X., Campoc J. Composition and Microstructural Changes of Cement Pastes Upon Heating, as Studied by Neutron Diffraction // *Cement and Concrete Research*. 2004. No. 34. pp. 1633-1644.
18. Quon D.H.H. Phase Changes in Concrete Exposed to Sustained High Temperatures / Division Report MRP/MSL 80-111(TR), Mineral Sciences Laboratories, CAANMET. Ottawa, Canada, 1980.
19. Harmathy T.Z., Allen L.W. Thermal Properties of Selected Masonry Unit Concretes // Journal of American Concrete Institute. 1973. No. 70. Pp. 132–142.

20. Phan L.T. Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the Art / NISTIR 5934. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. 1996. 105 p.
21. Schneider U. Properties of Materials at High Temperatures – Concrete / RILEM Committee 44-PHT. Kassel Universität, Germany. 1985.
22. Fire Design of Concrete Structures – In Accordance With CEB/FIP Model Code 90 / Comité Euro International Du Beton. CEB Bulletin D'Information No. 208. Switzerland, July 1991.
23. Furumura F. Stress-strain Curve of Concrete at High Temperatures // Transactions of the Architectural Institute of Japan, Abstract No 7004. 1966. p. 686.
24. Purkiss J.A., Bali A. The transient behaviour of concrete at temperature up to 800°C / Proceedings of the 10th Ibausil, Section 2/1. Hochschule fur Architektur und Bauwesen, Weimar. 1988. pp. 234–239.
25. Khoury G.A. Majorana C.E., Pesavento F., Schrefler B.A. Modelling of heated concrete // *Magazine of Concrete Research*. 2002. Vol. 54. No. 2. pp. 77-101.
26. Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A. Modelling of deformations of high strength concrete at elevated temperatures // *Materials and Structures*. 2004. Vol. 37. No. 268. pp. 218-236.
27. Bažant Z.P., Chern J.C. Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism // *Materials and Structures*. 1985. Vol. 18. No.103. pp. 1-20.

Информация об авторах:

Федоров Виктор Сергеевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
академик Российской академии архитектуры и строительных наук, докт. техн. наук, проф., заведующий кафедрой
«Строительные конструкции, здания и сооружения»,
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Левитский Валерий Евгеньевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»,
E-mail: dobriy_vecher@mail.ru

Information about authors:

Fedorov Viktor S.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,
Academician of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Building Construction, Buildings and Structures
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Levitsky Valery E.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of Building Construction, Buildings and Structures,
E-mail: dobriy_vecher@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.11.2025
Одобрена после рецензирования 21.11.2025
Принята к публикации 01.12.2025

The article was submitted 18.11.2025
Approved after reviewing 21.11.2025
Accepted for publication 01.12.2025