

Оценка сходимости результатов экспериментальных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с численными расчетами

Дмитрий Александрович Корольченко ✉, Евгений Александрович Артемьев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Достаточно сложным и наукоемким случаем расчетного обоснования комплексной, механической и пожарной безопасности зданий и сооружений является оценка фактической огнестойкости их несущих строительных конструкций, выполненных из различных материалов и, в частности, из железобетона. Существующие методические подходы к расчету огнестойкости железобетонных конструкций не учитывают теплотехнические характеристики армирования, что позволяет получать согласующие с результатами экспериментов значения предела огнестойкости конструкций только при расчете бетонных конструкций и железобетонных конструкций процентом армирования до 3,5 %.

Цель работы. Апробация методики проведения гибридного эксперимента и оценка сходимости результатов экспериментальных лабораторных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с теоретическими данными и численными расчетами. Были решены следующие задачи:

- в соответствии с разработанной методикой проведены аналитические, экспериментальные лабораторные и численные исследования огнестойкости сжатых бетонных и железобетонных элементов (в том числе с повышенными процентами армирования);
- выполнена оценка сходимости полученных результатов;
- разработаны выводы по рассматриваемым вопросам.

Методы исследования. Теоретические данные для сопоставления были получены аналитическим путем (по формулам и номограммам СП 468.1325800.2019), а экспериментальные и расчетные — в ходе параллельных экспериментальных исследований в огневой лаборатории НИУ МГСУ и численных исследований в программном комплексе ПК Abaqus. В ходе лабораторного эксперимента на прессовом оборудовании определялась прочность бетона контрольных кубов, с использованием разрывной машины — физико-механические характеристики арматурной стали. Далее изготавливались контрольные бетонные и железобетонные образцы с заданными характеристиками, после чего определялись температурные поля в бетонных и железобетонных поперечных сечениях образцов на основании данных термопар, а также испытывались центрально сжатые бетонные и железобетонные образцы в огневой камере при стандартной температуре пожара. Выполнялось моделирование исследуемых бетонных и железобетонных образцов с использованием объемных конечных элементов с размером до 10 мм и с использованием встроенного решателя «Heat transfer» (Теплообмен), проводился расчет распределения температурных полей при стандартной температуре пожара в бетонных и железобетонных элементах, а также расчеты огнестойкости железобетонных элементов при стандартном температурном пожаре.

Результаты и их обсуждение. В результате исследований установлены:

- приемлемая для практических целей сходимость значений температур в контрольных точках (по термопарам) в бетонных образцах, полученных при экспериментальных лабораторных исследованиях и при расчете по действующим нормам, что показывает корректность проведения эксперимента;
- приемлемая для практических целей сходимость значений температур в контрольных точках (по термопарам) в бетонных и железобетонных образцах в ходе экспериментальных лабораторных исследований и при численном расчете, что указывает на корректность предложенной методики гибридного эксперимента и достоверность проведенных исследований;
- значительная, необходимая к учету, разница результатов между экспериментальными и аналитическими значениями огнестойкости железобетонных элементов составляет от 10 до 30 % (в среднем для группы образцов — 19,3 %), что подтверждает гипотезу о снижении температуры прогрева бетонной части железобетонного сечения при учете теплотехнического влияния арматуры;
- приемлемая для практических целей сходимость результатов между экспериментальными и численными значениями огнестойкости железобетонных элементов (разница составляет от 7 до 10 %), что доказывает применимость разработанной методики гибридного эксперимента с учетом выдвинутой гипотезы об уменьшении прогрева бетона за счет учета теплотехнического влияния арматуры.

Выводы. Подтверждена гипотеза о снижении температуры прогрева бетонной части железобетонного сечения с высоким процентом армирования (более 3,5 %) при учете теплотехнического влияния арматуры. Следствием здесь являются заниженные значения огнестойкости железобетонных элементов, определенные в соответствии с нормируемым подходом. Также доказана применимость разработанной методики гибридного эксперимента с учетом выдвинутой гипотезы об уменьшении прогрева бетона за счет учета теплотехнического влияния арматуры.

Ключевые слова: огневое воздействие; огнестойкость строительных конструкций; теоретические данные; лабораторные исследования огнестойкости; численные исследования; математическое моделирование

Для цитирования: Корольченко Д.А., Артемьев Е.А. Оценка сходимости результатов экспериментальных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с численными расчетами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 69–79. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.69-79

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Evaluating convergence between results of experimental studies on fire resistance of compressed reinforced concrete elements, having a higher percentage of reinforcement, and results of numerical calculations

Dmitriy A. Korolchenko ✉, Evgeniy A. Artemyev

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Evaluation of actual fire resistance of load-bearing building structures made of various materials and reinforced concrete, in particular, encompasses a rather complex and research-intensive case of analysis of integrated, mechanical and fire safety of buildings and structures. Current methods of analyzing the fire resistance of reinforced concrete structures do not take into account any thermal characteristics of reinforcement. Hence, values of the fire resistance limit of structures can only be consistent with experimental results only if the percentage of reinforcement in analyzed concrete structures and reinforced concrete structures is below 3.5 %.

The purpose of the work. Is (1) the pilot testing of a hybrid experiment method and (2) evaluation of convergence between (a) results of experimental laboratory studies on fire resistance of compressed reinforced concrete elements with a higher percentage of reinforcement, (b) theoretical data and (c) numerical calculations. The following tasks were solved:

- in accordance with the developed method, analytical, experimental laboratory and numerical studies of fire resistance of compressed concrete and reinforced concrete elements (including those that have a higher percentage of reinforcement) were carried out;
- convergence between the obtained results was evaluated;
- conclusions were made about the issues under consideration.

Research methods. Theoretical data, applied for comparison purposes, were obtained analytically (using formulas and nomograms of SP (Construction Regulations) 468.1325800.2019), experimental and calculated data were obtained in the course of concurrent experimental studies conducted at the fire testing laboratory of NRU MGSU, and numerical studies were obtained using the Abaqus PC software package. In the course of a laboratory experiment made using the loading equipment, the strength of reference concrete templates was identified, using the tensile machine to find the physical and mechanical characteristics of reinforcing steel. Next, reference concrete and reinforced concrete specimens with pre-set characteristics were made. Then temperature fields in concrete and cross sections of specimens, containing reinforced concrete, were identified using the thermocouple data. Centrally compressed concrete and reinforced concrete specimens were tested in a fire chamber at a standard fire temperature. The behaviour of concrete and reinforced concrete specimens was simulated using volumetric finite elements, having the size of up to 10 mm, and a built-in Heat Transfer Solver (Heat transfer). Temperature field distribution and fire resistance of reinforced concrete elements were analyzed at a standard fire temperature in concrete and reinforced concrete elements.

Results and their discussion. The following knowledge was gained by means of this research project:

- convergence between temperature values at control points in concrete specimens (according to thermocouples), acceptable for practical purposes. These values were obtained in the course of experimental laboratory studies and calculations made according to current standards, which confirms the validity of the experiment;
- convergence between temperature values at control points in concrete specimens (according to thermocouples), acceptable for practical purposes. These values were obtained in the course of experimental laboratory studies and calculations made according to current standards, which confirms the validity of the proposed hybrid experiment method and the trustworthiness of the research;
- a great difference reaching 10 to 30 % (19.3 % on average for a group of specimens) between experimental and analytical values of fire resistance of reinforced concrete elements, which proves the hypothesis about a reduction in the heating temperature of concrete in a reinforced concrete section if the thermal influence of reinforcement is taken into account;

- convergence between fire resistance values (the difference is 7 to 10 %) in reinforced concrete specimens, which is acceptable for practical purposes. These values were obtained in the course of experimental laboratory studies and calculations, and their convergence proves the applicability of the proposed hybrid experiment method with account taken of the hypothesis about less intensive heating of concrete, if the thermal impact of reinforcement is taken into account.

Conclusions. The hypothesis about a reduction in the heating temperature of concrete in the reinforced concrete section that has a high percentage of reinforcement (more than 3.5 %) was proven, taking into account the thermal influence of reinforcement. The consequence is the underestimated values of fire resistance of reinforced concrete elements, identified in accordance with a standardized approach. The applicability of the proposed hybrid experiment technique is also proven, taking into account the hypothesis about a reduction in concrete heating due to the thermal influence of reinforcement.

Keywords: fire impact; fire resistance of building structures; theoretical data; laboratory studies of fire resistance; numerical studies; mathematical modelling

For citation: Korolchenko D.A., Artemyev E.A. Evaluating convergence between results of experimental studies on fire resistance of compressed reinforced concrete elements, having a higher percentage of reinforcement, and results of numerical calculations. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):69-79. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.69-79 (rus).

✉ Dmitriy Aleksandrovich Korolchenko, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Введение

Все здания и сооружения должны соответствовать определенным требованиям: функциональным, эксплуатационным, стоимостным и т.д. Одним из главных требований, предъявляемых к зданиям и сооружениям любого назначения, является их механическая и пожарная безопасность¹.

Базовые и перспективные методы расчетного обоснования механической безопасности зданий и сооружений в целом, а также их отдельных несущих строительных конструкций разработаны, апробированы и закреплены в нормах проектирования^{2, 3}. При этом достаточно сложным и наукоемким случаем расчетного обоснования комплексной, механической и пожарной безопасности зданий и сооружений является оценка фактической огнестойкости их несущих строительных конструкций, выполненных из различных материалов. Рядом специалистов и ученых в области пожарной безопасности, а именно: В.А. Пчелинцевым [1, 2], Э.Ф. Панюковым [3], И.Г. Романенковым [4], А.Е. Сегаловым [5], А.В. Забегаевым, В.М. Ройтманом [6, 7], А.Г. Тамразяном [8–10], В.С. Федоровым [11], Д.А. Корольченко [12, 13], К. Harada [14], D.D. Capua [15], M.C. McVay [16], A. Gibson [17], Duc Toan Pham [18], M.S. Abrams [19], P. Pimienta [20], J.Y. Kim [21] и др., были сделаны определенные разработки, позволяющие оценить несущую способность железобетонных конструкций, подверженных огневому воздействию. С точки зрения авторов, наибольший теоретический интерес и практическую значимость представляют

расчеты огнестойкости железобетонных конструкций как занимающих лидирующие позиции по объемам применения в современном строительстве. Ключевыми элементами (наиболее интенсивно работающими и имеющими наибольший требуемый предел огнестойкости по 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности») являются вертикальные несущие элементы, в первую очередь колонны и пилоны.

Подробный анализ специальной литературы по теме исследования [22–26] позволил сделать вывод, что существующие методические подходы к расчету огнестойкости железобетонных конструкций не учитывают теплотехнические характеристики армирования. При расчете бетонных конструкций и железобетонных конструкций с процентом армирования до 3,5 % с использованием существующих методик и подходов получаемые значения предела огнестойкости конструкций согласуются с результатами экспериментальных исследований [12, 27, 28]. В данных случаях расчеты на огнестойкость выполняются по бетонному сечению без учета теплотехнических характеристик армирования.

Результаты экспериментальных и расчетно-аналитических исследований железобетонных конструкций с высоким процентом армирования (более 3,5 %), в том числе с жестким армированием (преимущественно — колонны), подробно не освещены в специальной технической и научной литературе. При этом представляется целесообразным учет возможного изменения температурных полей прогрева бетона при наличии арматуры в сечении. Указанное теоретически должно привести к перераспределению температуры с бетона на арматуру, некоторому увеличению несущей способности конструкций на каждом из временных этапов пожара (фактически — к увеличению предела огнестойкости) и, как

¹ Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

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

³ СТО 36554501-006–2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций.

следствие, к возможности более экономичного проектирования конструкций.

Для проверки данной гипотезы авторами разработана методика и выполнен гибридный эксперимент, т.е. комплекс аналитических, экспериментальных лабораторных и численных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования (более 3,5 %). Преимущества такого подхода заключаются в возможности обоснованной минимизации продолжительных и дорогостоящих лабораторных исследований огнестойкости конструкций. Последнее возможно лишь в случае обеспечения приемлемой для практических целей сходимости результатов параллельных исследований для характерных случаев.

Материалы и методы

В настоящей статье освещена методика проведения гибридного эксперимента и представлены данные по оценке сходимости результатов экспериментальных лабораторных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с теоретическими данными и численными расчетами. Теоретические данные для сопоставления были получены аналитическим путем (по формулам и номограммам [2]), а экспериментальные и расчетные — в ходе параллельных экспериментальных исследований в огневой лаборатории НИУ МГСУ и численных исследований в программном комплексе ПК Abaqus. На основании полученных данных сформулированы основные выводы по рассматриваемым вопросам. В качестве *объекта исследования* были выбраны сжатые бетонные и железобетонные элементы в условиях огневых воздействий. *Предметом исследования* являлись такие искомые параметры и их сходимость для аналитических, экспериментальных лабораторных и численных исследований, как температурные поля поперечного сечения контрольных бетонных и железобетонных образцов, огнестойкость образцов. Также в процессе исследований оценивался экономический эффект от внедрения в практику проектирования результатов исследования.

Цель исследования — апробация методики проведения гибридного эксперимента и оценка сходимости результатов экспериментальных лабораторных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с теоретическими данными и численными расчетами.

Для достижения намеченной цели авторам потребовалось решить следующие основные задачи:

1. В соответствии с разработанной методикой провести аналитические, экспериментальные лабораторные и численные исследования огнестойкости

сжатых бетонных и железобетонных элементов (в т.ч. с повышенными процентами армирования).

2. Выполнить оценку сходимости полученных результатов.

3. Разработать выводы по рассматриваемым вопросам.

Методика проведения экспериментальных лабораторных исследований

Как уже было отмечено, принципиальным отличием предлагаемого авторами подхода является учет при проведении расчетов на огнестойкость тепло-технических характеристик армирования железобетонного сечения — арматурных стержней и/или прокатных стальных профилей. Для обоснования применимости предлагаемого подхода были проведены параллельные аналитические, экспериментальные лабораторные и численные исследования.

Основные этапы лабораторного эксперимента:

- изготовление экспериментальных бетонных и железобетонных образцов-призм с размерами $100 \times 100 \times 400$ мм общим количеством 21 шт., с заданными характеристиками, а также контрольных бетонных кубов ($100 \times 100 \times 100$ мм, 8 шт.) и призм ($100 \times 100 \times 400$ мм, 6 шт.);
- испытания контрольных кубов и призм на прессовом оборудовании для определения прочности бетона, определение физико-механических характеристик арматурной стали на разрывной машине;
- определение температурных полей в бетонных и железобетонных поперечных сечениях образцов на основании данных термопар (по 6 бетонных и железобетонных образцов);
- испытание центрально сжатых бетонных и железобетонных образцов в огневой камере при стандартной температуре пожара (3 бетонных образца и 6 железобетонных образцов).

Принятые характеристики испытываемых образцов-призм: класс бетона по прочности на сжатие для всех образцов — В40, продольное армирование железобетонных образцов — 4Ø16 класса А500, $A_s = 8,04 \text{ см}^2$ ($\mu = 8,04 \%$), поперечное армирование — замкнутые хомуты диаметром 6 мм класса А240.

В ходе эксперимента бетонные и железобетонные образцы-призмы были замаркированы с использованием следующего подхода:

- первый компонент в маркировке определяет тип образца: «Б» — бетонный, «ЖБ» — железобетонный;
- второй компонент в маркировке указывает тип испытаний: «Т» — исследование температурных полей, «О» — испытания на огнестойкость;
- третий компонент в маркировке указывает номер образца соответствующего типа испытаний.

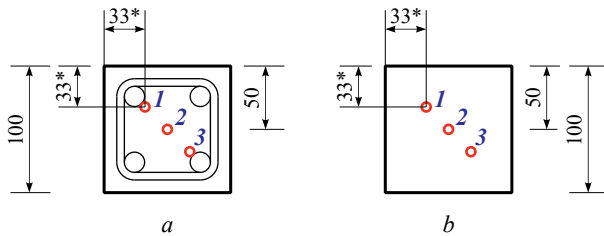


Рис. 1. Схема расположения термопар в железобетонном (а) и бетонном (b) сечениях: 1, 2, 3 — номера термопар

Fig. 1. Layout of thermocouples in reinforced concrete (a) and concrete (b) sections: 1, 2, 3 — thermocouple numbers

Например, маркировка «ЖБ-Т-2» означает, что испытывался второй из группы железобетонных образцов при исследовании температурных полей поперечного сечения элемента.

При проведении экспериментальных лабораторных исследований температурных полей бетонных и железобетонных элементов была принята следующая последовательность:

- установка термоэлектрических кабельных преобразователей (термопар) ТПК 005 в изготовленные образцы (рис. 1);
- установка образцов (по 6 шт.) в малогабаритную печь на равноудаленном расстоянии друг от друга, укрытие образцов сверху огнезащитным материалом — керамоволокном (рис. 2);
- получение в ходе испытаний фактических температур в контрольных точках бетонных и железобетонных образцов. В процессе испытания фиксировалась температура в исследуемых точках и сопоставлялась с продолжительностью огневого воздействия.

Экспериментальные исследования бетонных и железобетонных образцов на огнестойкость проводили в следующем порядке:

- установка доборной колонны, установка образца в горизонтальную печь;
- закрытие печи технологической крышкой, имеющей отверстие для гидроцилиндра пресса (рис. 3);
- загрузка образца расчетной нагрузкой, которая не увеличивается в процессе огневого воздействия (испытания);
- испытание образца огнем воздействием по стандартному изменению температуры пожара до достижения разрушения образца, с фиксацией времени огневого воздействия.

В процессе лабораторных испытаний в печи был создан стандартный температурный режим, характеризуемый следующей зависимостью:

$$T = 345 \lg(8t + 1) + T_0,$$

где T — температура в печи, соответствующая времени t , °C;



Рис. 2. Общий вид малогабаритной печи с установленными образцами перед испытанием

Fig. 2. General view of a small-sized furnace with specimens installed inside before testing



Рис. 3. Технологическое отверстие сверху горизонтальной печи для нагружения прессом во время огневого воздействия

Fig. 3. Service opening on top of a horizontal furnace for the application of loading during fire exposure

t — время нагрева, мин;

T_0 — температура в печи до начала теплового воздействия, °C.

Методика проведения численных исследований

При выполнении численных исследований температурных полей сечений и огнестойкости бетонных и железобетонных элементов использовался ПК Abaqus как эффективный инструмент решения для самых сложных задач в нелинейной поста-

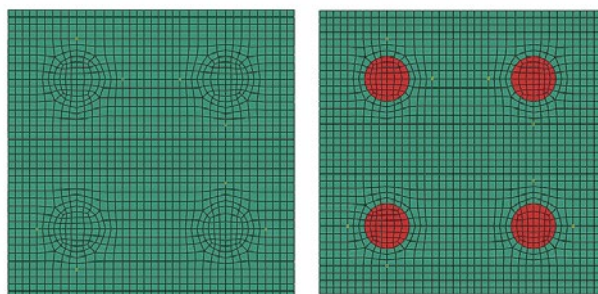


Рис. 4. Геометрическая модель и сетка объемных конечных элементов в бетонном (a) и железобетонном (b) сечениях

Fig. 4. Geometric model and mesh of volumetric finite elements in concrete (a) and reinforced concrete (b) sections

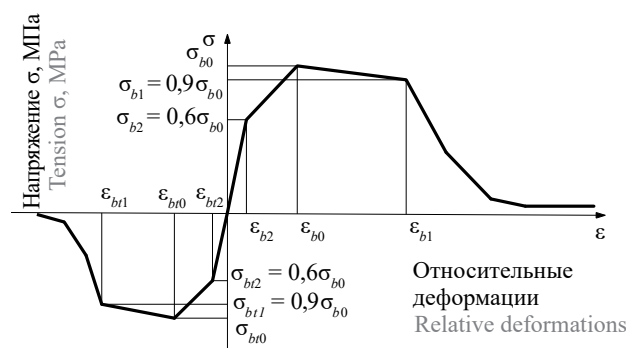


Рис. 5. Расчетная диаграмма деформирования бетона в ПК Abaqus

Fig. 5. Calculating diagram of concrete deformation in Abaqus software package

новке, в том числе при переменных характеристиках теплопроводности и теплоемкости.

При моделировании исследуемых бетонных и железобетонных образцов использовались объемные конечные элементы с размером до 10 мм (рис. 4).

Для решения задач, связанных с высокотемпературными нагревами, использовался встроенный решатель «Heat transfer» (Теплообмен), в свойствах которого задавались период времени решения и шаг приращения интегрирования, параметры теплопроводности и удельной теплоемкости для каждого материала.

При моделировании работы бетона использовалась нелинейная модель поведения на растяжение и сжатие (Concrete damage plasticity), которая учитывает образование и развитие трещин. Описание свойств деформирования бетона задавалось диаграммой, приведенной на рис. 5.

При моделировании арматуры использовалась модель пластичности (Plastic). Для описания свойств деформирования арматуры при одноосном растяжении/сжатии задавалось диаграммой, приведенной на рис. 6.

В программном комплексе Abaqus были выполнены численные расчеты, идентичные алгоритму

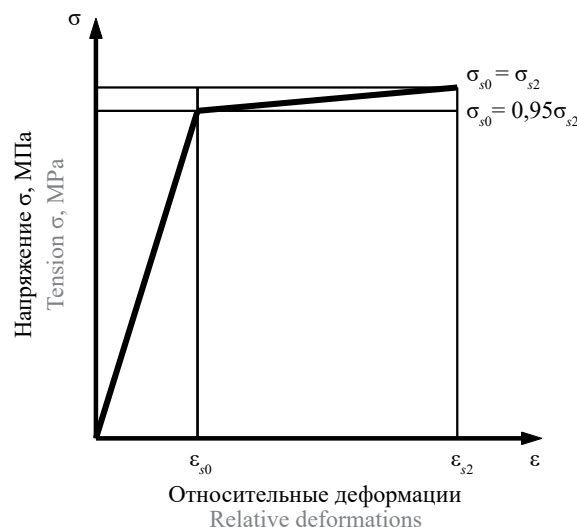


Рис. 6. Расчетная диаграмма деформирования арматуры в ПК Abaqus

Fig. 6. Calculating diagram of reinforcement deformation in Abaqus software package

проведения экспериментальных лабораторных исследований, а именно:

- расчет распределения температурных полей при стандартной температуре пожара в бетонных и железобетонных элементах;
- расчеты огнестойкости железобетонных элементов при стандартном температурном пожаре.

Результаты и их обсуждение

Оценка сходимости результатов экспериментальных лабораторных исследований температур прогревов поперечных сечений с результатами численных расчетов в ПК Abaqus

В табл. 1 представлены значения и результаты сравнительного анализа температур в контрольных точках поперечных сечений железобетонных и бетонных образцов, полученных при проведении экспериментальных исследований и численных расчетов в ПК Abaqus при 60 мин огневого воздействия.

На основании анализа данных табл. 1 сделаны следующие выводы:

1. Разница полученных результатов между экспериментальными и численными значениями температур в контрольных точках железобетонных сечений составляет от 3,2 до 3,7 %.
2. Разница полученных результатов между экспериментальными и численными значениями температур в контрольных точках бетонных сечений составляет от 2 до 2,2 %.
3. Выполненное сравнение полученных температур прогревов в ходе экспериментальных лабораторных исследования и при численном расчете показало приемлемую для практических целей

Таблица 1. Значения и результаты сравнительного анализа температур в контрольных точках поперечных сечений бетонных и железобетонных образцов при 60 мин огневого воздействия (экспериментальные данные и численные расчеты)

Table 1. Values and results of comparative analysis of temperatures at control points of cross sections of concrete and reinforced concrete specimens after 60 minutes' fire exposure (experimental data and numerical calculations)

Образец Specimen	Параметр Parameter	Натурный эксперимент $t_{н}$, °C Field experiment t_f , °C	Численный эксперимент $t_{н}$, °C Numerical experiment t_n , °C	$t_n/t_{н}$, % t_f/t_n , %
Железобетонный образец Reinforced concrete specimen	Температура в термопарах № 1/№ 3 Temperature in thermocouples No. 1/No. 3	790	816	3,2
	Температура в термопаре № 2 Temperature in thermocouple No. 2	698	725	3,7
Бетонный образец Concrete specimen	Температура в термопарах № 1/№ 3 Temperature in thermocouples No. 1/No. 3	823	839	2
	Температура в термопаре № 2 Temperature in thermocouple No. 2	731	763	2,2

сходимость результатов, что указывает на корректность предложенной методики гибридного эксперимента и достоверность проведенных исследований.

Оценка сходимости значений огнестойкости железобетонных образцов, полученных в ходе экспериментальных лабораторных, аналитических и численных исследований

Ввиду длительности проведения экспериментальных исследований на огневое воздействие, характеризующейся сложностью подготовки к каждому испытанию, переоснасткой, а также ограничением технических характеристик лабораторного пресса (100 тонн) расчетное время подтверждения огнестойкости при постоянном приложении нагрузки 418,79 кН принято 25 мин (1500 с).

В табл. 2 и на рис. 7 представлены значения и результаты сравнительного анализа огнестойкости железобетонных образцов, полученных при прове-

Таблица 2. Значения и результаты сравнительного анализа огнестойкости железобетонных образцов

Table 2. Values and results of comparative analysis of fire resistance of reinforced concrete specimens

Тип образца Specimen type	Огнестойкость / Fire resistance			Сравнение Comparison	
	Эксперимент t_e , мин Experiment t_e , min	СТО [3] $t_{сто}$, мин Corporate standard [3], $t_{c.st}$, min	Численный расчет $t_{чис}$ Numerical calculation t_{num}	$t_e/t_{сто}$ $t_e/t_{c.st}$	$t_e/t_{чис}$ t_e/t_{num}
ЖБ-О-1 RC-O-1	32,5	25	29,5	1,3	1,10
ЖБ-О-2 RC-O-2	31,5			1,26	1,07
ЖБ-О-3 RC-O-3	28			1,12	0,95
ЖБ-О-4 RC-O-4	29			1,16	0,98
ЖБ-О-5 RC-O-5	27,5			1,1	0,93
ЖБ-О-6 RC-O-6	30,5			1,22	1,03

дении экспериментальных исследований и определенных в ходе аналитических и численных расчетов.

На рис. 7 представлены графические зависимости вида «Нагрузка–Время» при испытании на огнестойкость железобетонных образцов.

На основании анализа данных табл. 2 и рис. 7 сделаны следующие выводы:

1. Разница полученных результатов между экспериментальными и аналитическими значениями огнестойкости железобетонных элементов составляет от 10 до 30 % (в среднем для группы образцов — 19,3 %). Таким образом, выявлена значительная, необходимая к учету разница результатов, что подтверждает гипотезу о снижении температуры прогрева бетонной части железобетонного сечения при учете теплотехнического влияния арматуры. Следствием здесь являются заниженные значения огнестойкости железобетонных элементов, определенные в соответствии с нормируемым подходом.

2. Разница полученных результатов между экспериментальными и численными значениями огнестойкости железобетонных элементов составляет от 7 до 10 %. Для группы образцов ЖБ-О-1, ЖБ-О-2 и ЖБ-О-6 установлено превышение осредненного экспериментального значения огнестойкости над осредненным численным на ~6,5 %, а для группы

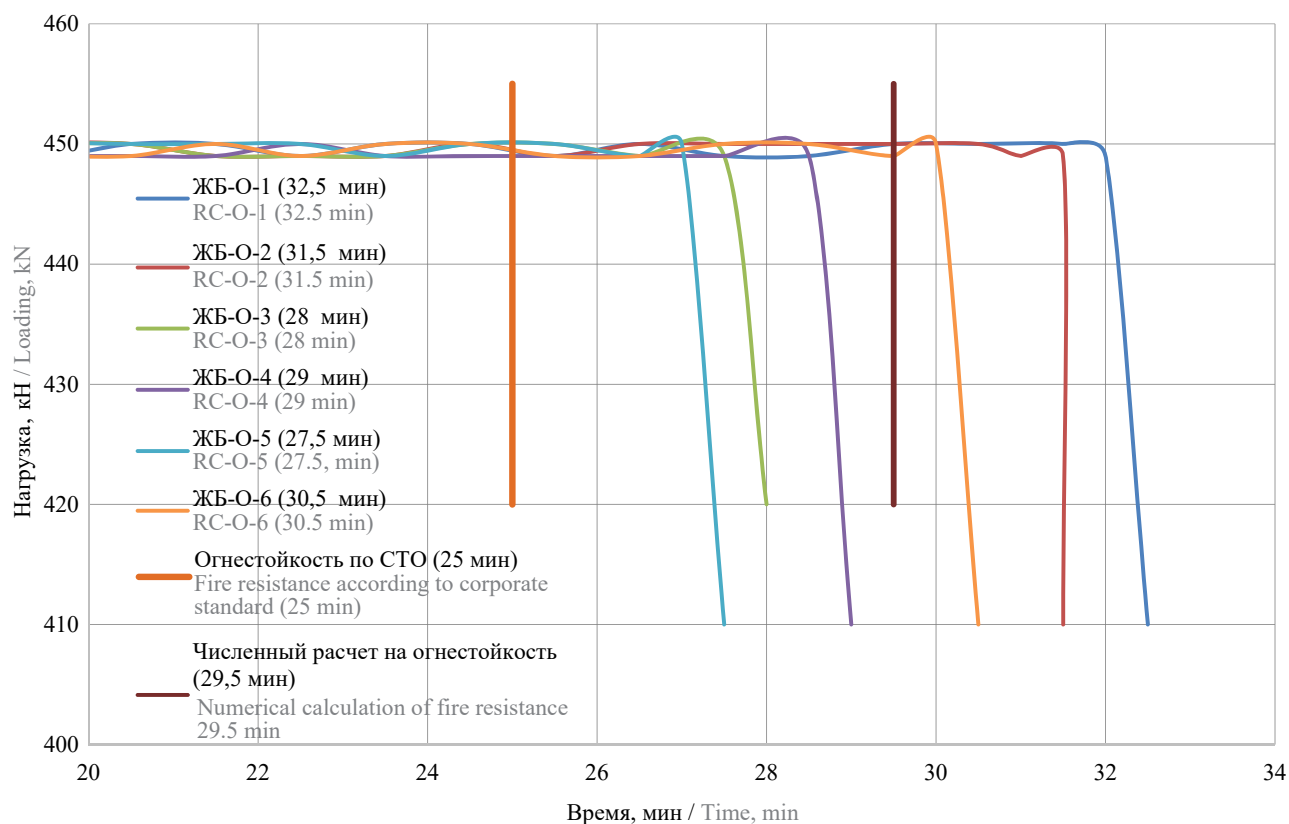


Рис. 7. Зависимости вида «Нагрузка–Время» при испытании на огнестойкость

Fig. 7. Loading to time dependences during the fire resistance test

образцов ЖБ-О-3, ЖБ-О-4 и ЖБ-О-5 — превышение осредненного численного значения огнестойкости над осредненным экспериментальным на ~4,5 %. Таким образом, установлена приемлемая для практических целей сходимость результатов, что доказывает применимость разработанной методики гибридного эксперимента с учетом выдвинутой гипотезы об уменьшении прогрева бетона за счет учета теплотехнического влияния арматуры.

3. Дополнительным подтверждением целесообразности учета теплотехнических параметров арматурных включений являются численные исследования, по результатам которых огнестойкость аналогичных натурным исследованиям образцов составляет 29,5 мин.

Выводы

Весь комплекс выполненных экспериментальных лабораторных, аналитических и численных исследований огнестойкости бетонных и железобетонных образцов, а также оценка сходимости полученных результатов позволили сделать следующие основные выводы:

1. Выполненное сравнение полученных температур прогревов в контрольных точках бетонных и железобетонных образцов в ходе экспериментальных лабораторных исследованиях и при численном

расчете показало приемлемую для практических целей сходимость результатов, что указывает на корректность предложенной методики гибридного эксперимента и достоверность проведенных исследований.

2. Разница полученных результатов между экспериментальными и аналитическими значениями огнестойкости железобетонных элементов составляет от 10 до 30 % (в среднем для группы образцов — 19,3 %). Таким образом, выявлена значительная, необходимая к учету разница результатов, что подтверждает гипотезу о снижении температуры прогрева бетонной части железобетонного сечения при учете теплотехнического влияния арматуры. Следствием здесь являются заниженные значения огнестойкости железобетонных элементов, определенные в соответствии с нормируемым подходом.

3. Разница полученных результатов между экспериментальными и численными значениями огнестойкости железобетонных элементов составляет от 7 до 10 %. Таким образом, установлена приемлемая для практических целей сходимость результатов, что доказывает применимость разработанной методики гибридного эксперимента с учетом выдвинутой гипотезы об уменьшении прогрева бетона за счет учета теплотехнического влияния арматуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пчелинцев А.В. Влияние совместной работы конструкций на огнестойкость зданий и сооружений // Обеспечение огнестойкости зданий и сооружений при применении новых строительных материалов и конструкций : мат. сем. М. : МДНТП, 1988. С. 5–20.
2. Пчелинцев А.В. Исследование остаточной несущей способности изгибаемых преднапряженных железобетонных конструкций после высокотемпературного воздействия (пожара) : дис. ... канд. техн. наук. М., 1988. 203 с.
3. Панюков Э.Ф. Оценка состояния железобетонных конструкций после пожара : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1991. 389 с.
4. Романенков И.Г. Методы огневых испытаний строительных материалов и конструкций. М. : ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1984. 56 с.
5. Сегалов А.Е. Учет влияния режимов нагрева на критические температуры арматурных и строительных сталей // Жаростойкие и обычные бетоны при действии повышенных и высоких температур. М. : НИИЖБ, 1988. С. 60–67.
6. Забегаев А.В., Тамразян А.Г., Дронов Ю.П., Ройтман В.М. Разработка способов снижения риска от пожаров зданий и сооружений // Жилищное строительство. 2002. № 2. С. 26–29.
7. Ройтман В.М., Приступок Д.М., Агафонова В.В. Возникновение и развитие теории стойкости конструкций и зданий при комбинированных особенных воздействиях с участием пожара // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 10. С. 4–12.
8. Тамразян А.Г. К оценке огнеударостойкости несущих железобетонных конструкций высотных зданий // Жилищное строительство. 2005. № 4. С. 7–8.
9. Тамразян А.Г., Мехрализадех А.Б. Особенности проявления огневых воздействий при расчете на прогрессирующее обрушение зданий с переходными этажами // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : мат. Междунар. академических чтений. Курск : 2012. С. 79–85.
10. Тамразян А.Г. Расчет внецентренно сжатых элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 29–35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23217619>
11. Федоров В.С., Левитский В.Е., Молчадский И.С., Александров А.В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2009. 408 с.
12. Корольченко Д.А., Артемьев Е.А. Расчет огнестойкости сжатых железобетонных элементов с учетом теплотехнических характеристик арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 6. С. 37–41. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.06.37-41
13. Корольченко Д.А., Поландов Ю.Х., Евич А.А. Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. № 29 (1). С. 9–21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21
14. Harada K.A. Study on the prediction of temperature rise in fire resistance test : Ph.D thesis. Kyoto University, 1992. 198 p.
15. Capua D.D., Mari A.R. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire // Fire Safety Journal. 2007. Vol. 42. Issue 2. Pp. 139–149. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.08.009
16. Chung J.H., Consolazio G.R., McVay M.C. Finite element stress analysis of a reinforced high-strength concrete column in severe fires // Computer & Structures. 2006. Vol. 84. Issue 21. Pp. 1338–1352. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.03.007
17. Davie C.T., Zhang H.L., Gibson A. Investigation of a continuum damage model as an indicator for the prediction of spalling in fire exposed concrete // Computer & Structures. 2012. Vol. 94–95. Pp. 54–69. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.12.002
18. Pham D.T., Buhan P., Florence C., Heck J.V., Nguyen H.H. Interaction diagrams of reinforced concrete sections in fire: A yield design approach // Engineering Structures. 2015. Vol. 90. Pp. 38–47. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.02.012
19. Lie T.T., Lin T.D., Allen D.E., Abrams M.S. Fire resistance of reinforced concrete columns // National research Council Canada Division of Building research. Ottawa, 1984. 196 p.
20. Pimienta P. New technique for measuring radial deformations of concrete at high temperatures // University Meetings of Civil Engineering. 2006. 187 p.
21. Sin Y.S., Park J.E., Mun J.-Y., Kim J.Y. Experimental studies on the effect of various design parameters on thermal behaviors of high strength concrete columns under high temperatures // Journal of the Korea Concrete Institute. 2011. Vol. 23. Issue 3. Pp. 377–384. DOI: 10.4334/JKCI.2011.ф23.3.377
22. Мурашев В.И. Оценка огнестойкости железобетонных конструкций // Пожарное дело. 1956. № 7. С. 94.
23. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 142 с.
24. Яковлев А.И. Расчет пределов огнестойкости сжатых железобетонных конструкций по критическим деформациям // Поведение строитель-

- ных конструкций в условиях пожара : сб. тр. ВНИИПО МВД СССР. М., 1987. С. 5–16.
25. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. М. : Стройиздат, 1986. 255 с.
 26. Милованов А.Ф., Соломонов В.В., Кузнецова И.С. Огнестойкость и огнесохранность зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 9. С. 39–40.
 27. Кузнецова И.С. Прочность и деформативность железобетонных конструкций, поврежденных пожаром : дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 155 с.
 28. Тамразян А.Г. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 29–35.

REFERENCES

1. Pchelintsev A.V. The influence of joint work of structures on the fire resistance of buildings and structures. *Ensuring the Fire Resistance of Buildings and Structures When Using New Building Materials and Structures : Materials of the Seminar*. Moscow, MDNTP Publ., 1988; 5-20. (rus).
2. Pchelintsev A.V. *Investigation of the residual load-bearing capacity of bent prestressed reinforced concrete structures after high-temperature exposure (fire) : dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 1988; 203. (rus).
3. Panyukov E.F. *Assessment of the state of reinforced concrete structures after a fire : dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 1991; 389. (rus).
4. Romanenkov I.G. *Methods of fire tests of building materials and structures*. Moscow, TsNTI on civil engineering and architecture, 1984; 56. (rus).
5. Segalov A.E. Taking into account the influence of heating modes on the critical temperatures of reinforcing and building steels. *Heat-Resistant and Conventional Concretes under the Action of Elevated and High Temperatures*. Moscow, NII ZHB Publ., 1988; 60-67. (rus).
6. Zabegaev A.V., Tamrazyan A.G., Dronov Yu.P., Roitman V.M. Development of methods reducing the risk from fires of buildings and structures. *Housing Construction*. 2002; 2:26-29. (rus).
7. Roitman V.M., Pripodyuk D.M., Agafonova V.V. Emergence and development of the theory of stability of structures and buildings at the combined special influences with participation of a fire. *Industrial and Civil Construction*. 2010; 10:4-12. (rus).
8. Tamrazyan A.G. To assess the fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures of high-rise buildings. *Housing Construction*. 2005; 4:7-8. (rus).
9. Tamrazyan A.G., Mehralizadeh A.B. Features of the manifestation of fire effects when calculating the progressive collapse of buildings with transitional floors. *Safety of the construction fund of Russia. Problems and solutions : Materials of international academic readings*. Kursk, 2012; 79-85.
10. Tamrazyan A.G. Calculation of out-of-center compressed elements under dynamic loading under conditions of fire impacts. *Industrial and civil construction*. 2015; 3:29-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23217619> (rus).
11. Fedorov V.S., Levitsky V.E., Molchadsky I.S., Alexandrov A.V. *Fire resistance and fire hazard of building structures*. Moscow, DIA Publ., 2009; 408. (rus).
12. Korolchenko D.A., Artemyev E.A. Calculation of fire resistance of compressed reinforced concrete elements taking into account the heat and technical characteristics of reinforcement. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 6:37-41. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.06.37-41 (rus).
13. Korolchenko D.A., Polandov Yu.Kh., Evich A.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. Experimental data. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2020; 29(1):9-21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21 (rus).
14. Harada K.A. *Study on the prediction of temperature rise in fire resistance test : Ph.D thesis*. Kyoto University, 1992; 198.
15. Capua D.D., Mari A.R. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire. *Fire Safety Journal*. 2007; 42(2):139-149. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.08.009
16. Chung J.H., Consolazio G.R., McVay M.C. Finite element stress analysis of a reinforced high-strength concrete column in severe fires. *Computer & Structures*. 2006; 84(21):1338-1352. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.03.007
17. Davie C.T., Zhang H.L., Gibson A. Investigation of a continuum damage model as an indicator for the prediction of spalling in fire exposed concrete. *Computer & Structures*. 2012; 94-95:54-69. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.12.002
18. Pham D.T., Buhan P., Florence C., Heck J.V., Nguyen H.H. Interaction diagrams of reinforced concrete sections in fire: A yield design approach. *Engineering Structures*. 2015; 90:38-47. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.02.012
19. Lie T.T., Lin T.D., Allen D.E., Abrams M.S. Fire resistance of reinforced concrete columns. *National research Council Canada Division of Building research*. Ottawa, 1984; 196.
20. Pimienta P. *New technique for measuring radial deformations of concrete at high temperatures*. University Meetings of Civil Engineering. 2006; 187.
21. Sin Y.S., Park J.E., Mun J.-Y., Kim J.Y. Experimental studies on the effect of various design parameters on

- thermal behaviors of high strength concrete columns under high temperatures. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2011; 23(3):377-384. DOI: 10.4334/JKCI.2011.23.3.377
22. Murashev V.I. *Assessment of fire resistance of reinforced concrete structures*. Moscow, Prosvetitel' Publ., 1956; 7:94. (rus).
 23. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 142.
 24. Yakovlev A.I. Calculation of fire resistance limits of compressed reinforced concrete structures by critical deformations. *Behavior of building structures in fire conditions : Sb. tr. VNIPO of the Ministry of Internal Affairs of the USSR*. Moscow, 1987; 5-16. (rus).
 25. Milovanov A.F. *Fire resistance of reinforced concrete structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986; 255. (rus).
 26. Milovanov A.F., Solomonov V.V., Kuznetsova I.S. Fire resistance and fire safety of buildings and structures. *Industrial and Civil Construction*. Moscow, 2002; 9:39-40. (rus).
 27. Kuznetsova I.S. Strength and deformability of reinforced concrete structures damaged by fire : *dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 1999; 155. (rus).
 28. Tamrazyan A.G. Calculation of non-centrally compressed elements under dynamic loading under conditions of fire impacts. *Industrial and Civil Construction*. 2015; 3:29-35. (rus).

Поступила 23.11.2022, после доработки 15.12.2022;

принята к публикации 27.01.2023

Received November 23, 2022; Received in revised form December 15, 2022;

Accepted January 27, 2023

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

АРТЕМЬЕВ Евгений Александрович, исследователь, преподаватель-исследователь, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 928691; ResearcherID: HKP-0992-2023; ORCID: 0000-0003-3649-7488; e-mail: eartemiev@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Evgeniy A. ARTEMYEV, Researcher, Lecturer-Researcher, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 928691; ResearcherID: HKP-0992-2023; ORCID: 0000-0003-3649-7488; e-mail: eartemiev@mail.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.