

В.С. ФЕДОРОВ¹, П.А. МАТВИЕНКО¹¹Российский университет транспорта, Москва, Россия

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Аннотация. В современных условиях при оценке огнестойкости строительных конструкций невозможно ограничиваться использованием только стандартной температурно-временной кривой пожара, поскольку она не отражает нестационарный и пространственно неоднородный характер теплового воздействия, присущий реальным пожарам. В статье, для анализа параметров железобетонной конструкций во времени реального пожара, использован программный комплекс Abaqus, который позволяет реализовать численное моделирование в термомеханической постановке задачи. Приведено описание численной модели железобетонной плиты перекрытия на основе принятой физической модели существующего каркаса, включая задание геометрических параметров, теплофизических и физико-механических свойств бетона и арматуры, а также условий теплового нагружения. Основная цель исследования заключается в проверке корректности заданных исходных данных в численной модели и в обосновании возможности дальнейших исследований на её основе. Валидация численного моделирования выполнена путём сопоставления результатов аналитического и численного методов расчёта теплотехнической задачи, при этом установленная в ходе сравнения допустимая сходимость подтверждает корректность принятой численной модели и обосновывает возможность её дальнейшего применения для анализа теплового воздействия реального пожара на железобетонные конструкции и оценки их огнестойкости.

Ключевые слова: Abaqus, перемещающийся пожар, численный метод

V.S. FEDOROV¹, P.A. MATVIENKO¹¹Russian University of Transport, Moscow, Russia

NUMERICAL STUDY OF THE HEAT-TRANSFER PROBLEM SOLUTION FOR A REINFORCED CONCRETE FLOOR SLAB WITHIN A FIRE COMPARTMENT USING ABAQUS

Abstract. Under current conditions, the fire resistance assessment of building structures cannot be limited to the use of the standard time-temperature fire curve, since it does not reflect the transient and spatially non-uniform thermal exposure inherent to real fires. This paper describes the use of the Abaqus software package to analyze the behavior of reinforced concrete structures under real-fire conditions, enabling numerical simulation within a coupled thermo-mechanical framework. A numerical model of a reinforced concrete floor slab is presented on the basis of the adopted physical model of an existing structural frame, including the definition of geometric parameters, the thermophysical and mechanical properties of concrete and reinforcement, and the thermal loading conditions. The main objective of the study is to verify the correctness of the input data specified in the numerical model and to substantiate the feasibility of further investigations based on it. Model validation is carried out by comparing the results obtained from analytical and numerical solutions of the heat-transfer problem; the acceptable agreement achieved in this comparison confirms the correctness of the adopted numerical model and supports its further application for analyzing the thermal effects of real fires on reinforced concrete structures and assessing their fire resistance.

Keywords: Abaqus, travelling fire, numerical method

1. Введение

В задачах огнестойкости использование одной лишь стандартной температурно-временной кривой (без учета реального режима роста температуры, отсутствия фазы охлаждения, неизменных условий работы материала) способно исказить расчётную картину предельных состояний несущих систем [1, 2]. Реальный пожар в пожарном отсеке носит нестационарный и пространственно неоднородный характер [3]: режим горения переходит от роста к полному развитию и далее к затуханию. Одним из определяющих факторов теплового воздействия является перемещающийся пожар [4-6]. Явление перемещающегося пожара можно охарактеризовать как форму теплового воздействия, при которой тепловой поток изменяется по координате конструкции и во времени, последовательно переходя и прогревая различные её участки. Игнорирование этого фактора способно привести как к избыточной, так и к недостаточной оценке времени до потери несущей способности. Стандартный нагрев зачастую переоценивает длительность высоких температур без учёта охлаждения, но недооценивает локальные экстремумы теплового потока и градиентов, определяющих прогрев арматуры и потерю устойчивости [1, 5].

В современных условиях при исследованиях поведения строительных конструкций при воздействии реального пожара применение исключительно аналитических методов является недостаточным, поскольку такие методы на упрощённых предположениях, одномерных или квазистационарных схемах теплопереноса и не позволяют в полной мере учитывать пространственное распределение температур, нелинейные свойства материалов и их деградацию при нагреве, а также сложный характер взаимодействия между элементами конструктивной системы [3, 7]. В этой связи приоритетное значение приобретает численный анализ строительных конструкций при воздействии реального пожара. В настоящее время при расчёте строительных конструкций всё более широкое применение находят автоматизированные программные комплексы, основанные на методе конечных элементов (Finite Element Method, FEM) [8, 9]. Указанный метод относится к численным методам решения дифференциальных уравнений в частных производных и интегральных уравнений, которые возникают при решении задач прикладной механики, теплофизики и строительной физики. Применение конечно-элементного анализа позволяет разбить расчётную область на совокупность конечных элементов и на этой основе получать решения задач с учётом сложной геометрии, нелинейных свойств материалов и разнообразных граничных условий.

Использование FEM в автоматизированных программных системах обеспечивает возможность решения широкого круга инженерных задач, к числу которых относятся исследования процессов теплопереноса, распределения температурных полей и температурных градиентов в элементах строительных конструкций. Одним из наиболее универсальных и распространённых программных комплексов, в которых реализован FEM, является Abaqus [9, 10], позволяющий выполнять связанный термомеханический анализ строительных конструкций и получать детализированную картину их напряжённо-деформированного состояния при воздействии высокотемпературных нагрузок.

Для проведения численных экспериментов в программном комплексе Abaqus по решению теплотехнической задачи при пространственно неоднородном тепловом воздействии необходимо выявить требуемые корректные исходные данные, определяющих геометрию расчётной области, физико-механические и теплофизические свойства материалов, нагрузочные воздействия и граничные условия. В настоящей работе, на основании принятых исходных данных, приведено описание принятой численной модели в среде Abaqus, а также выполнена проверка корректности получаемых результатов на основе сопоставления с аналитическим решением теплотехнической задачи. Такое сопоставление позволяет оценить адекватность принятой расчётной схемы и достоверность численного моделирования температурного поля в исследуемой конструкции.

2. Модели и методы

Описание принятой физической модели для анализа

В качестве исходной физической модели принята железобетонная плита перекрытия многоэтажного офисного здания, опертая на железобетонные колонны. Рассматриваемый пожарный отсек характеризуется пролётами размером 6×6 м как один из рядовых случаев при проектировании общественных зданий каркасного типа. Толщина плиты перекрытия составляет 200 мм. Колонны приняты сечением 400×400 мм. В качестве основного материала конструкции принят бетон класса В30, а в качестве рабочей растянутой арматуры — сталь класса А500С. Нагрузка, действующая на плиту перекрытия, принимается равной сумме нагрузки от собственного веса плиты и полезной нагрузки $= 3 \text{ кН/м}^2$. Тепловое воздействие принято равным 753 МДж/м^2 . При анализе методов будет рассматриваться сечение по центру конструкции, как самое деформируемое.

Численная модель

Применяемая численная модель в программной среде Abaqus, предназначена для исследования термомеханического отклика железобетонной плиты при воздействии пожарной нагрузки. Для обеспечения корректного воспроизведения температурных и деформационных процессов применён связанный анализ типа coupled temp–displacement, позволяющий совместно учитывать теплоперенос и изменение напряжённо-деформированного состояния конструкции [9-11].

Исходная геометрия плиты и арматурного каркаса была сформирована в системе CATIA V5 и импортирована в пространство Abaqus (см. рисунки 1, 2). Анализ нагрева по высоте КЭ возможен благодаря внутренним интеграционным точкам, в которых вычисляются температурно-зависимые параметры состояния. На каждом шаге нестационарного анализа по заданной зависимости «время–температура» последовательно решается связанная термopрочностная задача при установленных граничных условиях теплообмена и закрепления. При этом напряжённо-деформированное состояние определяется с учётом текущего температурного поля, деградации свойств материалов и исходной геометрии конструкции, что обеспечивает корректное воспроизведение пространственной и временной эволюции поведения элемента при нагреве.

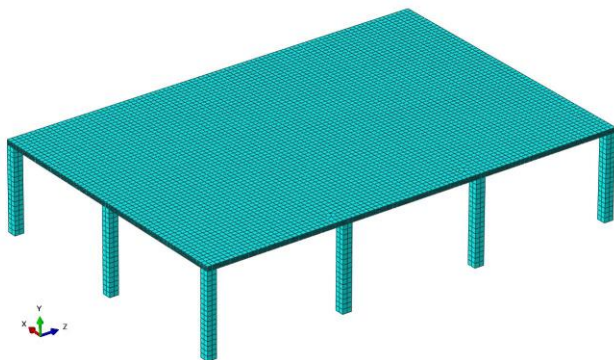


Рисунок 1 - Разбиение модели на объёмные конечные элементы

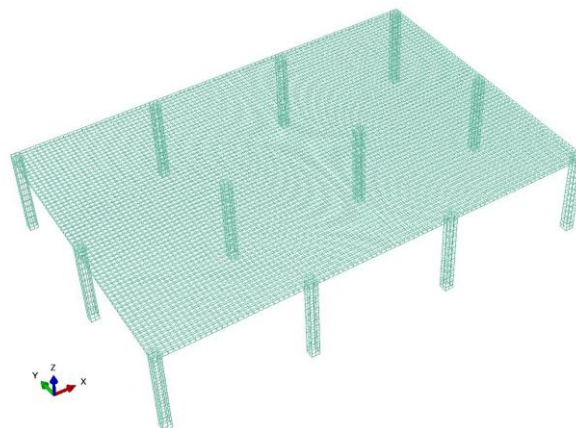


Рисунок 2 - Разбиение модели на стержневые конечные элементы

Модель механического состояния бетона под нагрузкой принята по предложенной О.В. Радайкиным криволинейной диаграмме «напряжение–деформация» [2, 12, 13]. В качестве критерия вводится безразмерная величина (формула 1):

$$D = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_2} \right)^2 \quad (1)$$

где ε — текущая деформация; ε_2 — предельная деформация бетона (отдельно для растяжения и сжатия).

Напряжения при растяжении $\sigma_{bt}(\varepsilon_{bt})$ и сжатии $\sigma_b(\varepsilon_b)$ задаются аналитическими выражениями вида:

$$\sigma_{bt} = \alpha_t^{(t)} E \varepsilon_{bt} - b_t^{(t)} D_{bt} E; \sigma_b = \alpha_c^{(c)} E \varepsilon_b - b_c^{(c)} D_b E \quad (2)$$

в которых коэффициенты α_t, b_t, c_t и α_c, b_c, c_c рассчитываются через расчетные сопротивления бетона R_{bt}, R_b , деформации в вершине диаграммы $\varepsilon_{bt0}, \varepsilon_{b0}$ и определенные деформации $\varepsilon_{bt2}, \varepsilon_{b2}$. Для практики автор предлагает определять эти параметрические точки по нормам СП 63.13330, после чего по полученным формулам строятся согласованные диаграммы (см. рис. 3) при растяжении и сжатии для бетонов различных классов прочности. Таким образом, модель сочетает нормативно совместимую параметризацию с явным учетом накопления повреждений через деформационный критерий D [12]. Указанные параметры рассматриваются как функции температуры и аппроксимируются по нормативным кривым поведения с использованием интерполяции, после чего для каждого температурного уровня формируются диаграммы «напряжение–деформация» для бетона и стали, используемые при последующем численном моделировании.

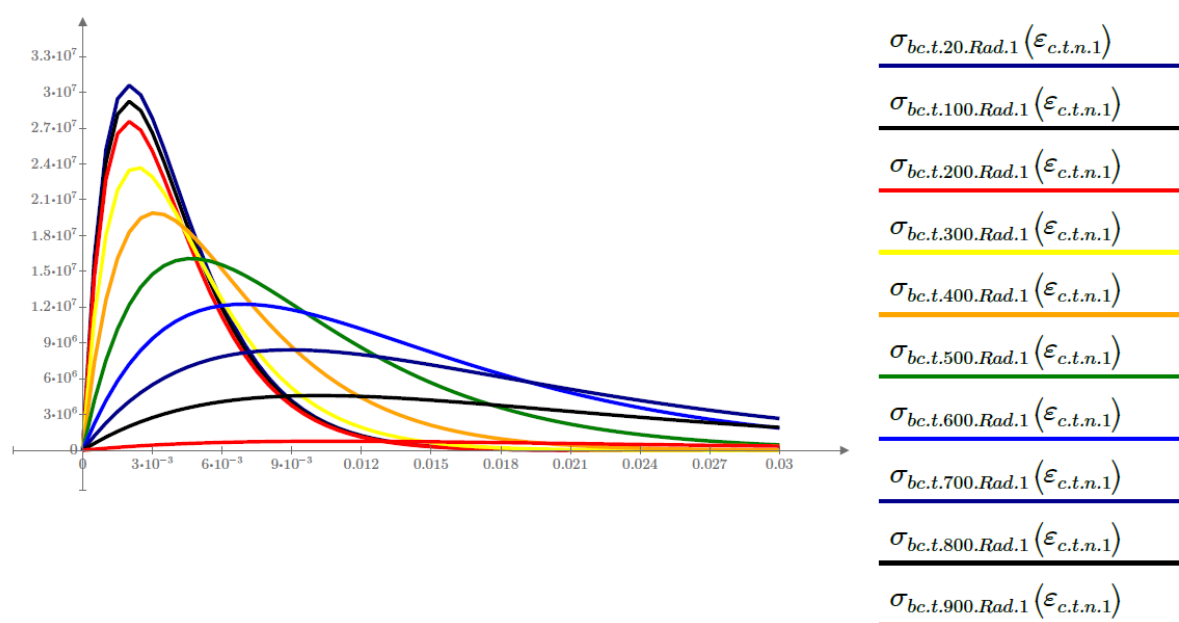


Рисунок 3 - Диаграмма деформирования бетона по О.В. Радайкину при температуре 20÷900 °C

Физико-механические характеристики бетона и арматуры задавались упругими и пластичными свойствами, описанными ниже. Прочность бетона в условиях температурного воздействия принимается в виде (формула 3):

$$R_{b.f} = R_b \cdot \gamma_{b.f} \quad (3)$$

где $\gamma_{b.f}$ — коэффициент условия работы бетона при температурных воздействиях.

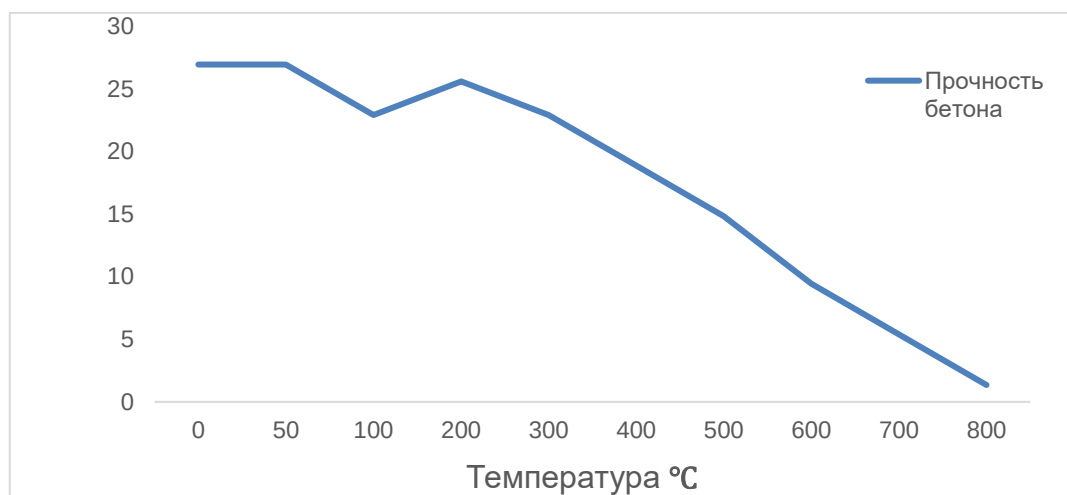


Рисунок 4 - Прочность бетона в зависимости от температуры
Модуль упругости:

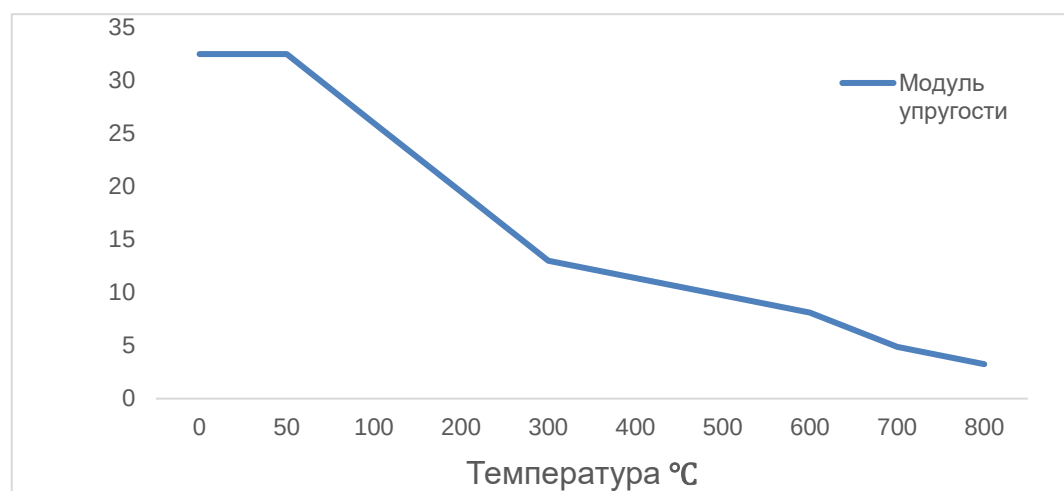


Рисунок 5 - Модуль упругости бетона в зависимости от температуры

3. Результаты исследования и их анализ

Аналитическое решение

В качестве основы для аналитического расчета была принята методология, разработанная В. М. Ройтманом [14-16]. Теоретическую основу применённого подхода составляет его докторская диссертация «Оценка огнестойкости строительных конструкций на основе кинетических представлений о поведении материалов в условиях пожара» [14], в которой сформулированы фундаментальные положения кинетической теории огнестойкости и изложен метод определения предельного состояния конструкций через эволюцию их термически изменяющихся свойств. Прикладные аспекты методологии Ройтмана использованы в соответствии с положениями монографии «Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий» [15], где приведены физические основы огнестойкости, принципы инженерной интерпретации пределов огнестойкости и расчетные схемы для стандартных и реальных пожарных режимов.

Температурная кривая пожара установлена исходя из пожарной нагрузки, проёмности и теплоаккумулирующей способности ограждающих конструкций.

Для аналитического расчета принято, что помещение имеет источник дополнительной вентиляции в виде двух окон размерами 3x2(h) м в вертикальных ограждающих конструкциях. Приведённая проёмность помещения составила $K1 = 0.0911 \text{ м}^{1/2}$.

Приведённая пожарная нагрузка — 640.05 МДж/м².

Коэффициент режима пожара — $\psi = 1.213$.

Определено время достижения максимальной температуры среды при пожаре в помещении $\tau_{max} = 53.032$ мин (0.884 ч.).

Тепловой источник на стадии развития пожара $\theta_{\psi} = 1534.253$ °С.

Стадия затухания принята линейной убывающей функцией со скоростью:

11.6 °С/мин.

Для моделирования прогрева плиты использован коэффициент температуропроводности бетона $\alpha_{tpr} = 0.001294 \frac{m^2}{ch}$.

Прогрев защитного слоя определяется через относительное расстояние между зоной растянутой арматуры и толщиной прогретой части плиты.

Критическая температура арматуры по условиям потери несущей способности $t_{s.cr} = 498$ °С.

Таблица 1 - Фактические температуры растянутой арматуры в интервале времени 0.16–2.0 ч

Время пожара (ч)	Температура арматуры (°С)
0.16	63.6
0.25	26.2
0.50	193.3
0.75	340.1
1.00	448.8
1.148	498
1.25	532.1
1.50	598.3
1.75	652.5
2.00	698.0

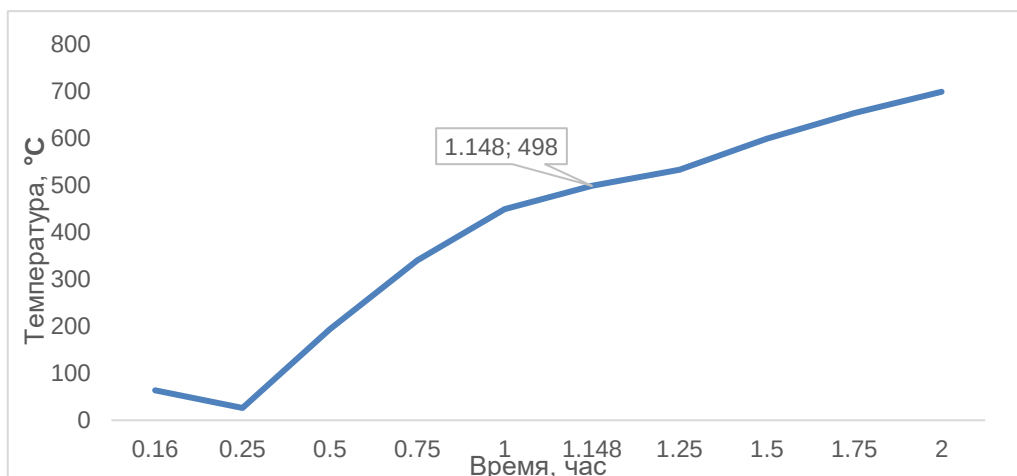


Рисунок 6 - Температура рабочей растянутой арматуры плиты в стадии развития пожара в помещении

Максимальная рассчитанная температура арматуры: 698 °С. Критическая температура достигается за 1,148 ч.

Численное решение

В процессе расчёта, выполняемого в программном комплексе Abaqus, реализуется последовательное и взаимосвязанное решение тепловой и механической подсистемы, основанное на методах нелинейного конечно-элементного анализа. На первом этапе вычислительный алгоритм формирует температурное поле, определяемое решением нестационарного уравнения теплопроводности с учётом теплоёмкости, теплопроводности и

условий теплообмена на границах конструкции. Температура в каждом конечном элементе обновляется по мере продвижения расчёта во времени, что позволяет моделировать развитие термического воздействия пожара и пространственный характер прогрева железобетонного сечения. На рис. 7 показаны значения температуры в узлах конечных элементов арматуры на начальной стадии нагрева и после температурного воздействия в течение 1.5 ч.

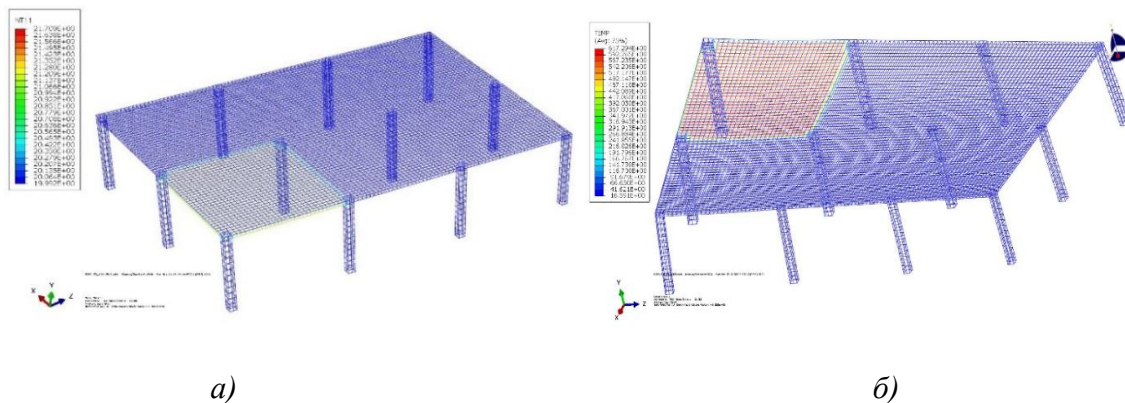


Рисунок 7 - Температура в узлах КЭ арматурной сетки: а) Начальная заданная температура, б) температура после 1.5 часов воздействия

Таблица 2 - Фактические температуры растянутой арматуры в интервале времени 0.16–1.5 ч

Время пожара (ч)	Температура арматуры (°C)
0,16	21,4
0,17	35,84
0,18	55,54
0,2	72,6
0,25	92,67
0,27	115,62
0,29	141,29
0,3	169,65
0,38	184,8
0,41	200,7
0,43	234,7
0,5	272
0,56	313
1,09	498
1,5	501

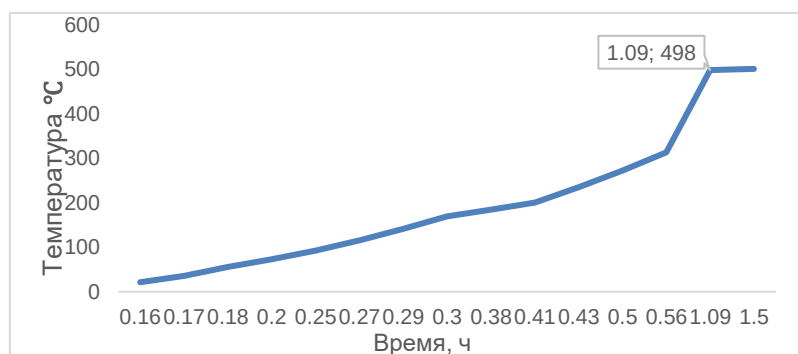


Рисунок 8 - Эволюция температуры в рабочей растянутой арматуре со временем

Критическая температура рабочей растянутой арматуры достигается через 1.09 ч.

4. Заключение

1. Сопоставление результатов аналитического и численного методов расчёта показало удовлетворительное согласование параметров термического отклика арматуры в условиях пожарного воздействия.
2. Согласно аналитической методике, основанной на температурно-временных зависимостях нагрева железобетонного сечения, достижение критической температуры рабочей растянутой арматуры происходит на моменте 1.149 ч.
3. Численный расчёт, выполненный в программном комплексе Abaqus с учётом реального теплопереноса и температурно-зависимых свойств материалов, показал достижение того же критического состояния через 1.09 ч.
4. Различие между двумя значениями составляет порядка 5 %, что соответствует высокому уровню сходимости для инженерных расчётов, включающих нелинейные температурные и механические эффекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров, В. С. Актуальные проблемы оценки огнестойкости конструкций в составе несущей системы здания / В. С. Федоров // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования : материалы Национальной научно-практической конференции, Астрахань, 09 февраля 2018 года. – Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 3-7.
2. Радайкин, О. В. Совершенствование методики расчёта жёсткости изгибаемых элементов из обычного железобетона с применением теорий силового сопротивления : специальность 05.23.01 "Строительные конструкции, здания и сооружения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Радайкин Олег Валерьевич. – Казань, 2012. – 183 с.
3. Hesien, Mohamed & Youssef, Maged & El-Fitany, Salah. (2025). Finite Element Analysis of Flat Plate Structures in Fire. Fire. 8. 252. 10.3390/fire8070252.
4. Сугрова, В. Е. Перемещающиеся пожары: методология и влияние на конструктивные характеристики / В. Е. Сугрова, П. А. Матвиенко // Потенциал интеллектуально одарённой молодежи - развитию науки и образования : материалы VIII Международного научного форума молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников, Астрахань, 23–25 апреля 2019 года. Том 2. – Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 55-64.
5. Матвиенко, П. А. Перемещающийся пожар: моделирование динамики температуры / П. А. Матвиенко // Безопасность строительного фонда России проблемы и решения : материалы Международных академических чтений, Курск, 14 ноября 2025 года. – Курск: Курский государственный университет, 2025. – С. 62-68.
6. Stern-Gottfried, Jamie & Rein, Guillermo. (2012). Travelling fires for structural design–Part I: Literature review. Fire Safety Journal. 54. 74–85. 10.1016/j.firesaf.2012.06.003.
7. Gao, Wan-Yang & Dai, Jian-Guo & Teng, J.G. & Chen, Guangming. (2013). Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire. Engineering Structures. 52. 488–501. 10.1016/j.engstruct.2013.03.017.
8. Zheng, Yong-Qian & Zhuang, Jin. (2011). Analysis on Fire Resistance of Reinforced Concrete Wall. Advanced Materials Research. 243-249. 797-800. 10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.797.
9. Hua, Nan & Elhami Khorasani, Negar & Tessari, Anthony. (2022). Numerical modeling of the fire behavior of reinforced concrete tunnel slabs during heating and cooling. Engineering Structures. 258. 114135. 10.1016/j.engstruct.2022.114135.
10. Elshorbagi, Mohamed & AlHamaydeh, Mohammad. (2023). Simulation of RC Beams during Fire Events Using a Nonlinear Numerical Fully Coupled Thermal-Stress Analysis. Fire. 6. 57. 10.3390/fire6020057.
11. Stern-Gottfried, Jamie & Rein, Guillermo & Bisby, Luke & Torero, Jose. (2010). Experimental review of the homogeneous temperature assumption in post-flashover compartment fires. Fire Safety Journal. 45. 249-261. 10.1016/j.firesaf.2010.03.007.
12. Радайкин, О. В. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение / О. В. Радайкин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 10. – С. 29-39.
13. Радайкин, О. В. Теоретические основы диаграммного метода расчёта стержневых элементов из армированного бетона / О. В. Радайкин // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 6(92). – С. 26-42.
14. Ройтман, В.М. Оценка огнестойкости строительных конструкций на основе кинетических представлений о поведении материалов в условиях пожара : диссертация ... доктора технических наук : 05.26.01. - Москва, 1985. - 412 с.

15. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В.М. Ройтман – Москва : Изд-во Ассоц. «Пожарная безопасность и наука», 2001 г.
16. Ройтман В. М., Приступок Д. Н. Особенности оценки стойкости зданий и сооружений из железобетонных конструкций при комбинированных особых воздействиях с участием пожара // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. Том 19. №7.

REFERENCES

1. Fedorov V.S. Aktualnye problemy otsenki ognestoykosti konstruktsiy v sostave nesushchey sistemy zdaniya [Current issues in assessing the fire resistance of structures within a building's load-bearing system]. *Innovatsionnoe razvitie regionov: potentsial nauki i sovremennogo obrazovaniya : materialy Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Astrakhan, 09 fevralya 2018 goda. Astrakhan: Astrakhanskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet; 2018:3-7. (rus)
2. Radaykin O.V. Sovershenstvovanie metodiki rascheta zhestkosti izgibaemykh elementov iz obychnogo zhelezobetona s primeneniem teoriy silovogo soprotivleniya [Improvement of the method for calculating the stiffness of bent elements made of ordinary reinforced concrete using theories of force resistance] [dissertation]. Kazan; 2012. 183 p. (rus)
3. Hesien M., Youssef M., El-Fitany S. Finite Element Analysis of Flat Plate Structures in Fire. *Fire*. 2025;8(7):252. doi:10.3390/fire8070252.
4. Sugrova V.E., Matvienko P.A. Peremeshchayushchiesya pozhary: metodologiya i vliyanie na konstruktivnye kharakteristiki [Travelling fires: methodology and impact on structural characteristics]. *Potentsial intellektualno odaryonnoy molodezhi - razvitiyu nauki i obrazovaniya : materialy VIII Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma molodykh uchenykh, innovatorov, studentov i shkolnikov*. Astrakhan, 23-25 aprelya 2019 goda. Tom 2. Astrakhan: Astrakhanskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet; 2019:55-64. (rus)
5. Matvienko P.A. Peremeshchayushchiysya pozhar: modelirovanie dinamiki temperatury [Travelling fire: modeling temperature dynamics]. *Bezopasnost stroitelnogo fonda Rossii: problemy i resheniya : materialy mezhdunarodnykh akademicheskikh chteniy*. Kursk, 14 noyabrya 2025 goda. Kursk: Kurskiy gosudarstvennyy universitet; 2025:62-68. (rus)
6. Stern-Gottfried J., Rein G. Travelling fires for structural design–Part I: Literature review. *Fire Safety Journal*. 2012;54:74-85. doi:10.1016/j.firesaf.2012.06.003.
7. Gao W.-Y., Dai J.-G., Teng J.G., Chen G.M. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire. *Engineering Structures*. 2013;52:488-501. doi:10.1016/j.engstruct.2013.03.017.
8. Zheng Y.-Q., Zhuang J. Analysis on Fire Resistance of Reinforced Concrete Wall. *Advanced Materials Research*. 2011;243-249:797-800. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.797.
9. Hua N., Elhami Khorasani N., Tessari A. Numerical modeling of the fire behavior of reinforced concrete tunnel slabs during heating and cooling. *Engineering Structures*. 2022;258:114135. doi:10.1016/j.engstruct.2022.114135.
10. Elshorbagi M., AlHamaydeh M. Simulation of RC Beams during Fire Events Using a Nonlinear Numerical Fully Coupled Thermal-Stress Analysis. *Fire*. 2023;6(2):57. doi:10.3390/fire6020057.
11. Stern-Gottfried J., Rein G., Bisby L., Torero J. Experimental review of the homogeneous temperature assumption in post-flashover compartment fires. *Fire Safety Journal*. 2010;45:249-261. doi:10.1016/j.firesaf.2010.03.007.
12. Radaykin O.V. Sravnitelnyy analiz razlichnykh diagramm deformirovaniya betona po kriteriyu energozatrat na deformirovanie i razrushenie [Comparative analysis of various concrete deformation diagrams based on the criterion of energy consumption for deformation and fracture]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2019;10:29-39. (rus)
13. Radaykin O.V. Teoreticheskie osnovy diagrammnogo metoda rascheta sterzhnevyykh elementov iz armirovannogo betona [Theoretical foundations of the diagram method for calculating reinforced concrete bar elements]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. 2020;6(92):26-42. (rus)
14. Roytman V.M. Otsenka ognestoykosti stroitelnykh konstruktsiy na osnove kineticheskikh predstavleniy o povedenii materialov v usloviyakh pozhara [Assessment of fire resistance of building structures based on kinetic concepts of material behavior under fire conditions] [dissertation]. Moscow; 1985. 412 p. (rus)
15. Roytman V.M. Inzhenernye resheniya po otsenke ognestoykosti proektiruemykh i rekonstruiemykh zdaniy [Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings]. Moscow: Izd-vo Assots. "Pozharnaya bezopasnost i nauka"; 2001. (rus)
16. Roytman V.M., Pristupyuk D.N. Osobennosti otsenki stoykosti zdaniy i sooruzheniy iz zhelezobetonnnykh konstruktsiy pri kombinirovannykh osobykh vozdeystviyakh s uchastiem pozhara [Features of assessing the resistance of buildings and structures made of reinforced concrete structures under combined special impacts involving fire]. *Pozharovzryvobezopasnost*. 2010;19(7). (rus)

Информация об авторах

Фёдоров Виктор Сергеевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения»,
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Матвиенко Павел Алексеевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»,
E-mail: ms.ol@mail.ru

Information about author

Fedorov Viktor S.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,
doctor in tech. sc., prof., head of the dep. of civil and industrial engineering
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Matvienko Pavel A.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,
PhD student, dep. of civil and industrial engineering
E-mail: ms.ol@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.01.2026
Одобрена после рецензирования 09.02.2026
Принята к публикации 12.02.2026

The article was submitted 15.01.2026
Approved after reviewing 09.02.2026
Accepted for publication 12.02.2026