

Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spb.ru



Огнестойкость металлоконструкций на примере метода численного моделирования

А.В. Бардин¹, О.Ю. Сударь²

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251,
Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 699.81

История

Подана в редакцию 13.05.2015

Ключевые слова

Численное моделирование;
огнестойкость;
ANSYS;
металлоконструкции;
конструктивная защита;

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматриваются проблемы моделирования огнестойкости металлических конструкций. Целью исследования является определение достоверности результатов численного моделирования и применения полученных результатов для параметрического расчета огнестойкости металлических конструкций, а именно моделирование работы вспенивающихся защитных покрытий. Численное моделирование проводилось в среде программного комплекса ANSYS.

¹ Контактный автор:
+7 (931) 354 6847, kmbav@gmail.com (Бардин Алексей Владимирович, студент)
² +7 (906) 241 0130, SudarOlga@mail.ru (Сударь Ольга Юрьевна, магистрант)

1. Введение

Потенциальная пожароопасность зданий и сооружений определяется количеством и свойствами материалов, находящихся внутри зданий и сооружений, а также, способностью конструкций сопротивляться воздействию пожара в течение определенного времени.

Практика показывает, что продолжительность пожаров может колебаться в значительных пределах, однако в большинстве случаев не превышает 2-3 часов. Данные о продолжительности и температурах на реальных пожарах были положены в основу температурных режимов для испытаний строительных конструкций на огнестойкость. В 1966 г. Международной организацией по стандартизации была рекомендована стандартная температурная кривая, которая принята в большинстве стран мира в качестве температурного режима для испытаний строительных конструкций на огнестойкость и регламентирована Строительными нормами и правилами (СНиП), отраслевыми стандартами и Нормами пожарной безопасности (НПБ).

Проведенные в последние 50 лет ВНИИПО МЧС РФ и ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко теоретические и экспериментальные исследования процессов горения в условиях пожаров позволяют с достаточной для практических целей точностью прогнозировать процесс развития пожара в зависимости от особенностей воздухообмена в помещении, количества и вида пожарной нагрузки, под которой подразумеваются находящиеся в помещении горючие материалы, а также теплотехнических характеристик материалов ограждающих конструкций помещения, определяющих их огнестойкость [1].

Изучение огнестойкости конструкций и огнегасящей эффективности покрытий экспериментальными способами являет собой серьезную проблему. Заключается она в трудоемкости проведения экспериментов и сложности получения полного спектра информации, отражающей поведение всех элементов конструкции под воздействием пожарной нагрузки.

Таким образом появляется необходимость в использовании методик численного моделирования, позволяющих получать требуемые параметры максимально точно и достоверно для всех элементов испытываемой конструкции.

2. Обзор литературы

На данный момент в Российской Федерации методики численного моделирования огнестойкости строительных конструкций не имеют широкого применения. Методы численного моделирования затрагиваются в работах Н.В. Гогоберидзе и Н.В. Благородовой [2], В.В. Агафоновой [3] и А.В. Иванова [4], а также в работах зарубежных ученых: А.Р. Mouritz и др., А.Г. Gibson [5], Yaqiang Jiang и др. [6], коллектива авторов Outinen J. и др. [7], Zheng Wei [8].

Вопросы устойчивости строительных конструкций в условиях пожара рассматриваются в работе коллектива авторов Guo-Qiang Lia и др. [9], изучение прогрессирующего разрушения металлоконструкций отражено в работе коллектива авторов Gian-Luca F. Porcari и др. [10].

Исследования защиты бетонных конструкций от огня проводилось в работе авторов David Rush [11] и Young-Sun Neo [12].

Вопросы определения рисков возникновения пожаров рассматривают в своих работах Arshad Ahmad [13] и M.K. Dey [14].

Анализ проблематики устройства и правильного проектирования огнезащиты строительных конструкций рассматривается в работах Qing Dong и др. [15], Zuo Jiaxu [16] и Ma Qian-li [17].

Обширный иностранный опыт представляет определенный интерес для применения в отечественном проектировании.

Существующие методы определения требуемой огнестойкости строительных конструкций не позволяют не только осуществить полноценную защиту строительных конструкций от пожарной нагрузки, но и обеспечить ее наибольшую экономическую целесообразность.

3. Цели и задачи исследования

Исходя из проведенного анализа литературы, можно сделать вывод, что методики численного моделирования огнестойкости строительных конструкций незначительно затронуты отечественными учеными и представляют большой интерес для изучения, так как позволяют автоматизировать расчеты и определять параметры пожара, воздействующие непосредственно на элементы конструкции, работающие во взаимосвязи друг с другом.

Целью работы является разработка математической модели методики численного моделирования требуемой огнестойкости строительных конструкций.

Для достижения поставленной цели ставятся следующие задачи:

- 1) провести анализ строительных конструкций, которые должны быть защищены от воздействия огня, и исследование существующей нормативной базы, методов расчета огнезащиты и огнестойкости строительных конструкций;
- 2) на основе проведенного анализа нормативной базы, методов расчета и научных изысканий оценить применимость ПК ANSYS для проведения расчетов на определение огнестойкости строительных конструкций;
- 3) определение применимости методики построения и расчета в проектировании конструкций.

4. Защита конструкций от воздействия огня

4.1. Основные виды защищаемых конструкций

Огнезащита строительных конструкций (СК) играет важную роль в системе обеспечения пожарной безопасности различных объектов. Она предназначена для снижения пожарной опасности объектов и обеспечения их требуемой огнестойкости.

К числу объектов, для которых проблема оптимальной огнезащиты имеет особенно большое значение, относятся:

- конструкции с нормируемыми пределами огнестойкости (колонны, балки, ригели, плиты перекрытий, рамные конструкции);
- огнестойкие воздуховоды и газопроводы систем противодымной защиты зданий и сооружений;
- кабельные коммуникации различных типов (силовые, осветительные, контрольные) и кабельные проходки через огнестойкие строительные конструкции;
- резервуары с нефтепродуктами и сжиженными газами и другие элементы нефтегазодобывающего и нефтехимического комплекса.

В условиях пожара перечисленные объекты подвергаются совместному действию силовых нагрузок и высоко температурного нагрева. Температура воздействующей на них газовой среды может изменяться во времени как по режимам реального пожара, так и по стандартным режимам. Продолжительность огневого воздействия может достигать 2,5 ч и более. Характерные значения плотности теплового потока, падающего на поверхность объектов в условиях развитого пожара, составляют около 50 кВт/м^2 . На рисунке 1 представлены различные температурные режимы пожара.

На практике при оценке эффективности огнезащиты и огнестойкости конструкций наиболее часто используется так называемый стандартный температурный режим (согласно рисунку 1, кривая II). Несмотря на то, что изменение температуры среды, воздействующей на конструкции при реальном пожаре, как правило, существенно отличается от стандартной температурно-временной зависимости, этот режим был рекомендован международной организацией по стандартизации (ИСО) в качестве общепринятого температурного режима пожара.

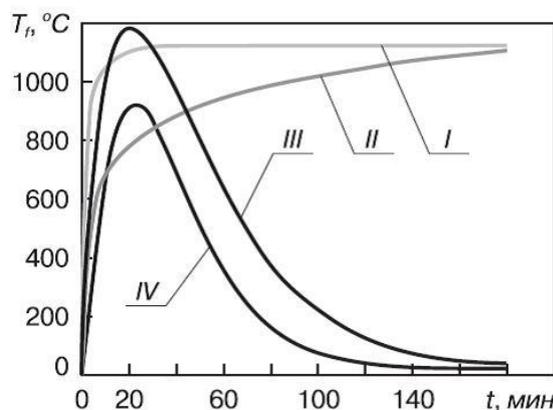


Рисунок 1. Зависимость температуры от времени воздействия газовой среды в условиях пожара

На рисунке 1 обозначены следующие температурные кривые:

- I – температурный режим горения углеводородных топлив;
- II – стандартный температурный режим;
- III – температурный режим реального пожара в помещении площадью $S = 35 \text{ м}^2$ с горючей нагрузкой $F = 60 \text{ кг/м}^2$;
- IV – температурный режим реального пожара в помещении площадью $S = 9,5 \text{ м}^2$ с горючей нагрузкой $F = 50 \text{ кг/м}^2$ [18].

4.2. Огнестойкость строительных конструкций

Огнестойкость СК, под которой понимается способность строительной конструкции сопротивляться воздействию высокой температуры в условиях пожара и при этом сохранять свои обычные эксплуатационные функции, относится к числу основных характеристик конструкций. Мерой огнестойкости конструкций является предел огнестойкости, который определяется временем в часах от начала пожара и в течении которого конструкция теряет свою несущую, ограждающую способность или целостность.

При проектировании зданий и сооружений требуемая огнестойкость СК достигается за счет выбора соответствующих материалов, конструктивных решений и применением огнезащиты. Практика показывает, что применение огнезащиты, является наиболее экономичным путем достижения требуемой огнестойкости, однако применение тех или иных технических решений и материалов для огнезащиты определяется типами материалов, из которых выполнены те или иные строительные конструкции [19].

Традиционно в строительстве широко применяются каменные, бетонные и железобетонные, металлические и деревянные конструкции.

Каменные конструкции имеют высокую естественную огнестойкость, которая определяется их высокими теплофизическими свойствами и массивностью.

Бетонные и железобетонные конструкции, благодаря сравнительно небольшой теплопроводности бетона, достаточно хорошо сопротивляются воздействию пожара, однако ввиду того, что современные железобетонные конструкции, как правило, выполняются тонкостенными и пустотными без монолитной связи с другими элементами здания, их способность выполнять свои функции ограничена одним часом, а иногда и менее того. Предел огнестойкости железобетонных конструкций зависит от размеров ее сечения, толщины защитного слоя, вида, количества и диаметра арматуры, класса бетона, вида заполнителя, нагрузки на конструкцию, схемы опор и влажности бетона в условиях эксплуатации здания. Наибольшей огнестойкостью обладает бетон с влажностью около 3,5 %, однако увлажненные бетоны с плотностью выше 1200 кг/м³ даже при кратковременном действии пожара могут взрываться, что может привести к быстрому разрушению конструкции.

При одних и тех же конструктивных параметрах предел огнестойкости балок меньше, чем плит, так как при пожаре балки обогриваются с трех сторон, а плиты только с двух. Плиты, опирающиеся по контуру, имеют предел огнестойкости значительно выше, чем плиты, опирающиеся на две стороны [20].

Металлические конструкции имеют относительно небольшую огнестойкость. Во время пожара они быстро нагреваются и уже через 15-40 минут после начала пожара могут снизить свои расчетные параметры в 2 раза, а при последующем воздействии высоких температур или их перепада разрушиться.

Критическая температура, при которой происходит потеря несущей способности металлоконструкций принята равной 500 °С. Фактический предел огнестойкости металлоконструкций в зависимости от толщины элементов сечения и действующих напряжений составляет от 0,1 до 0,4 часа, в то время как минимальные значения требуемых пределов огнестойкости металлоконструкций составляет от 0,25 до 2,5 часов в зависимости от степени огнестойкости здания и типа конструкции [21].

Проведенный анализ фактических пределов огнестойкости СК различных типов (за исключением деревянных конструкций) показал, что наименьшую огнестойкость имеют металлические конструкции [22].

Так как металл является наиболее перспективным видом конструктивных материалов [23], дальнейшее моделирование огнестойкости будем производить на примере металлоконструкций.

5. Существующие методы расчета огнестойкости

Способы повышения пределов огнестойкости и снижения классов пожарной опасности несущих строительных конструкций за счет использования так называемой пассивной огнезащиты является в настоящее время традиционным.

Метод расчета предела огнестойкости несущей конструкции состоит в решении сначала статической части задачи огнестойкости (с целью определения величины критической температуры конструкции, при которой несущая способность уменьшится при нагреве до величины нормативной нагрузки на конструкцию), а затем второй части расчета – теплотехнической, где определяют время прогрева с учетом применяемого средства огнезащиты до наступления критической температуры конструкции. Для конструктивных материалов используется методика, разработанная во ВНИИПО МЧС России, автор методики д.т.н., профессор А.И. Яковлев [24-26].

5.1. Перспективные методы расчета огнестойкости

Фактические пределы огнестойкости СК должны подтверждаться результатами огневых испытаний конструкций, однако сложность и длительность подобных испытаний для строительных конструкций не всегда позволяет получить полный спектр необходимых данных.

Поэтому для определения огнестойкости строительных конструкций наравне с экспериментальными методами могут быть использованы и методы численного моделирования. В п. 11 ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость» и в п. 10 ст. 87 ФЗ-123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» говорится, что пределы огнестойкости и классы пожарной опасности, аналогичные по форме, материалам и конструктивному исполнению строительным конструкциям, прошедшим огневые испытания, могут определяться расчетно-аналитическими методами, установленными нормативными документами по пожарной безопасности.

Согласно вышеизложенному, перспективным методом расчета требуемой огнестойкости строительных конструкций является метод моделирования пожарной нагрузки на строительные конструкции способом численного моделирования.

Среди программных комплексов (ПК), применяемых для проведения численного моделирования огневого воздействия на конструкции, был выбран ПК ANSYS [27] так как по результатам сравнительных исследований, проведенных Агофоновой В.В. [28], применение ПК ANSYS для моделирования огнестойкости строительных конструкций дает хорошую сходимость с результатами реальных огневых испытаний ВНИИПО МЧС РФ [29] для незащищенных от воздействия огня конструкций. Таким образом существуют необходимость в создании методик и программ численного моделирования и параметрического расчета огнестойкости конструкций.

6. Предлагаемая методика

Методика предполагает моделирование конструкций в ПК ANSYS с последующим моделированием воздействующей пожарной нагрузки.

Для простоты расчета и анализа результатов избрана простая стоечно-балочная схема, которая будет подвергнута воздействию огня в двух разных вариантах:

- без покрытия огнезащитными покрытиями;
- с покрытием вермикулитовыми плитами толщиной 20 и 50 мм.

При моделировании воздействия пожара также будет учитываться факт отвода тепла поверхностями строительных конструкций, которые экранированы от прямого воздействия тепла.

Расчетная схема представлена на рисунке 2.

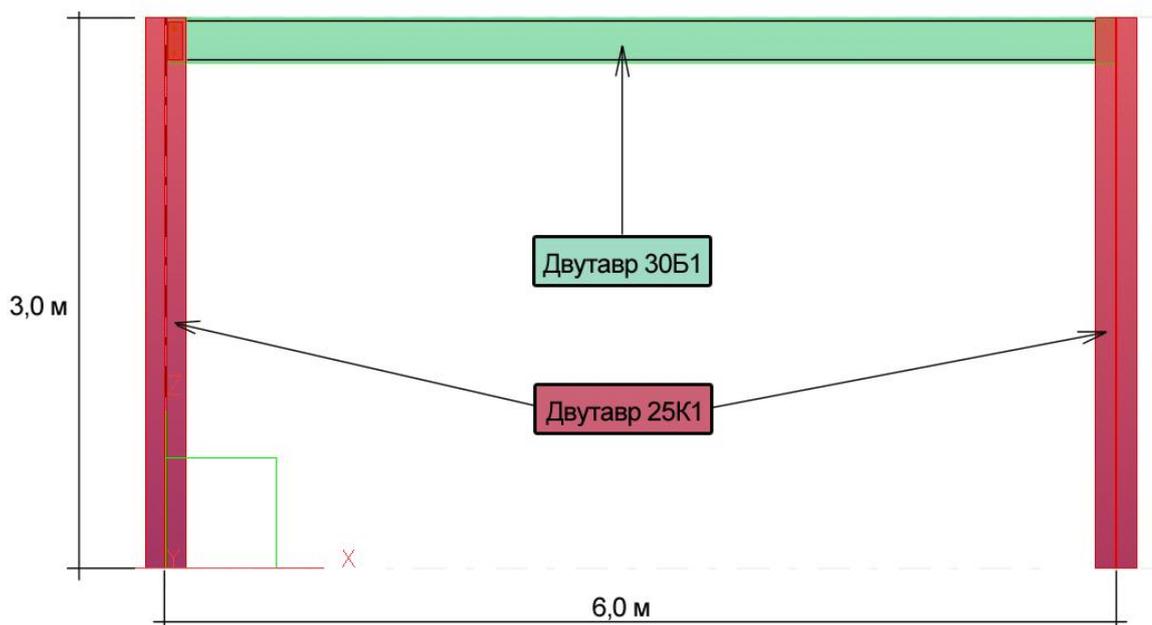


Рисунок 2. Расчетная схема

Сечения и материал основных элементов конструкции приняты следующими:

- колонны – двутавр 25К1, сталь – 245, длина элемента 3,0 м;
- балка – двутавр 30Б1, сталь – 245, длина элемента 6,0 м.

Полезная нагрузка на балку принята равной 200 кг/м.

Процесс моделирования расчетной схемы заключался в последовательном ее построении в среде программного комплекса ANSYS. Особое внимание при построении схемы было уделено заданию материалов в подразделе «Engineering Data», так как программный комплекс ANSYS позволяет моделировать не только задачи строительной механики, но и моделировать передачу конструкции тепла от различных источников.

На рисунке 3 представлены полученные в ходе моделирования температурно-временные зависимости.

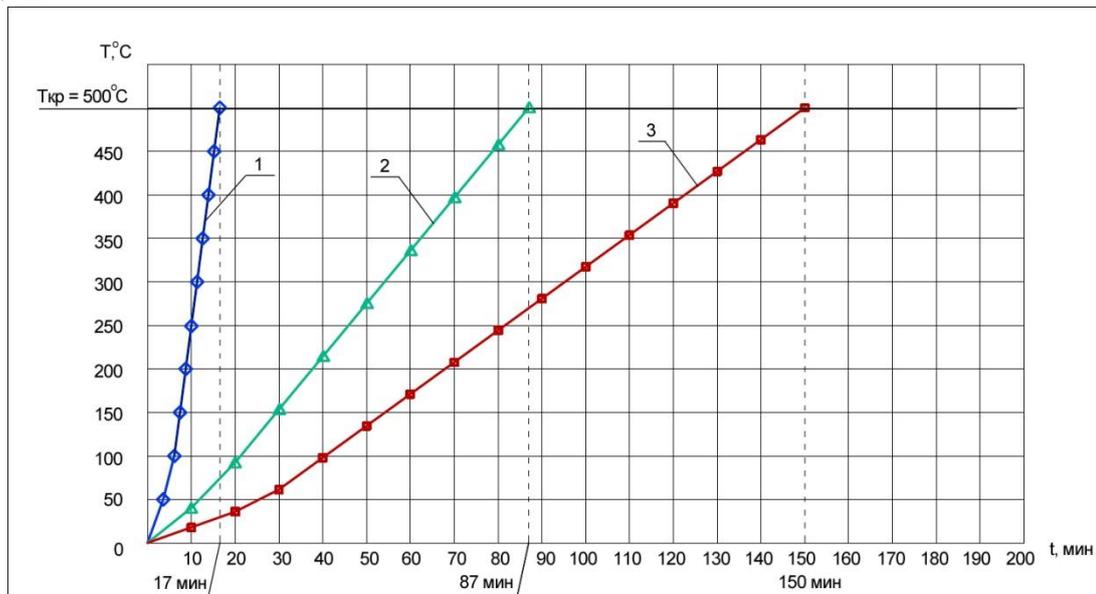


Рисунок 3. Температурно-временные зависимости достижения предела огнестойкости конструкции

На рисунке 3 под номером 1 обозначена кривая нагрева образца без огнезащиты, номером 2 и 3 — кривые нагрева образца с защитным слоем 20 и 50 мм соответственно. Диаграммы прогрева колонн и балки по сечению без защитного слоя представлены на рисунках 4 и 5.

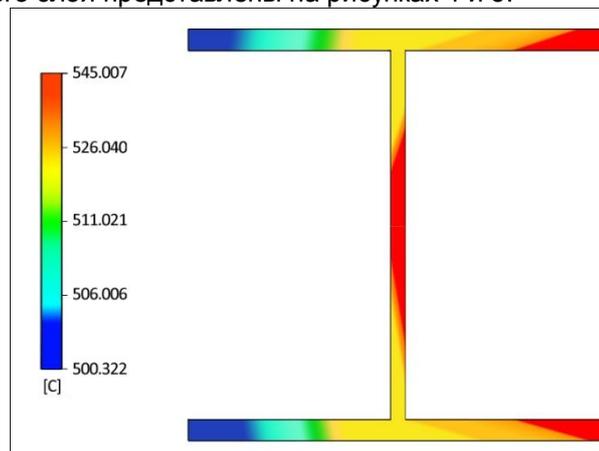


Рисунок 4. Диаграмма нагрева колонны без учета защитного покрытия (двутавр 25К1)

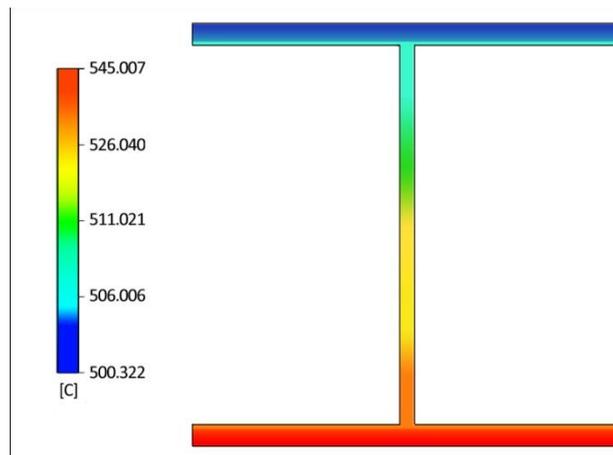


Рисунок 5. Диаграмма нагрева колонны без учета защитного покрытия (двутавр 30Б1)

Диаграммы нагрева колонн и балок с учетом защитного слоя представлены на рисунка 6 и 7 соответственно.

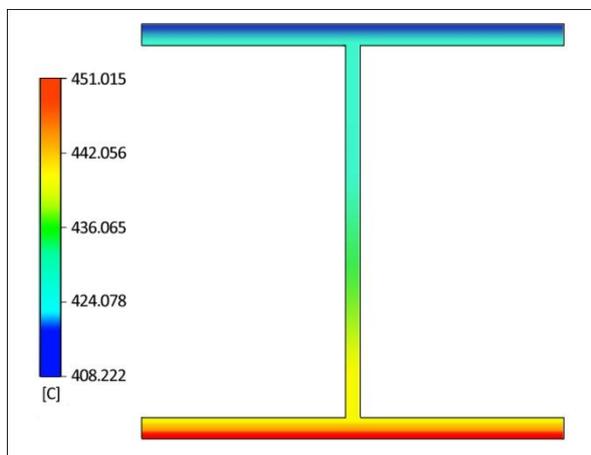


Рисунок 6. Диаграмма нагрева колонны с учетом защитного покрытия (двутавр 25К1)

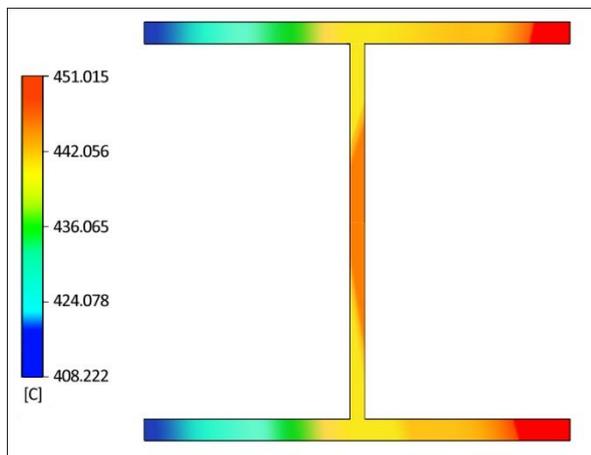


Рисунок 7. Диаграмма нагрева колонны с учетом защитного покрытия (двутавр 30Б1)

Полученные результаты имеют достаточно хорошую сходимость с результатами натуральных огневых испытаний проводимых силами ВНИИПО МЧС РФ, наглядно видна разница в температурных полях распространяющихся по сечению без учета и с учетом защитного слоя.

В связи с этим определяется дальнейшее направление работы, связанное с анализом результатов моделирования различных расчетных схем с различными видами конструктивной защиты в среде ANSYS и выявление характеристик теплового воздействия на них с целью объединения их в программу параметрического расчета требуемой огнестойкости конструкций на основе табличного процессора Excel.

7. Выводы

В результате проведенного исследования поведения стальных конструкций, защищенных от пожара в условиях воздействия огневой нагрузки были получены следующие результаты:

- 1) произведен анализ существующих методов определения огнестойкости строительных конструкций и выявлена необходимость применения параметрического расчета огнестойкости, с целью ускорения и упрощения работы проектировщика;
- 2) произведена оценка достоверности результатов численного моделирования реальным испытаниям;
- 3) произведен расчет примерной конструкции как без защитного покрытия, так и с защитным покрытием с целью определения необходимых параметров защиты;
- 4) определено дальнейшее направление работы в виде написания программ для параметрического расчета конструкций на требуемую огнестойкость и решение более объемных задач численного моделирования огневого воздействия пожара на конструкции, защищенные вспенивающимися защитными покрытиями.

Литература

- [1]. Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1991. 320 с.
- [2]. Гогоберидзе Н.В., Благородова Н.В. К вопросу автоматизации системы определения предела огнестойкости строительных конструкций // Инженерный вестник дон. 2012. №4-1 (22). С. 100-103.
- [3]. Агафонова В.В. Численное моделирование при оценках огнестойкости стальных конструкций с применением огнезащиты из вермикулитовых плит // Известия южного федерального университета.технические науки. 2013. №8 (145).С. 173-177.
- [4]. Иванов А.В. Выбор и определение параметров физических соотношений моделей сплошных сред, описывающих физико-механические свойства сталей при высоких гомологических температурах // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции "Машиностроительные технологии", 16-17 декабря 2008. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 138-139.
- [5]. Mouritz A.P., Feih S., Kandare E., Gibson A.G. Thermal–mechanical modelling of laminates with fire protection coating (2013) Composites Part B: Engineering, Vol. 48. pp. 68-70.
- [6]. YaqiangJiang, PanagiotisKotsovinos, Asif Usmani, Guillermo Rein, Jamie Stern-Gottfried Numerical Investigation of Thermal Responses of a Composite Structure in Horizontally Travelling fires Using OpenSees (2013) Procedia Engineering Vol. 62. pp. 736-744.
- [7]. Outinen J., Samec J., Sokol Z. Research on Fire Protection Methods and a Case Study "Futurum" (2012) Procedia Engineering Volume 40. pp. 334-340.
- [8]. Zheng Wei Application of Computer Simulation Technology [CST] in Buildings' Performance-Based Fire Protection Design (2012) Procedia Engineering Volume 37. pp. 25–30.
- [9]. Guo-Qiang Lia, Wei-Yong Wang, Su-Wen Chen A simple approach for modeling fire-resistance of steel columns with locally damaged fire protection (2009) Engineering Structures, Vol. 31, Iss. 3. pp. 617-632.
- [10]. Gian-Luca F. Porcari, EhabZalok, Waleed Mekky Fire induced progressive collapse of steel building structures: A review of the mechanisms (2015) Engineering Structures Volume 82. pp. 261–267.
- [11].David Rush, Luke Bisby, Martin Gillie, Allan Jowsey, Barbara Lane Design of intumescent fire protection for concrete filled structural hollow sections (2014) Fire Safety Journal Volume 67. pp. 13–23.
- [12].Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han Construction application of Fibre/Mesh method for protecting concrete columns in fire (2011) Construction and Building Materials Volume 25, Issue 6. pp. 2928–2938.
- [13].Arshad Ahmad, Siti Ayesah Hassan, Adnan Ripin, Mohamad W. Ali, Saharudin Haron A risk-based method for determining passive fire protection adequacy (2013) Fire Safety Journal Volume 58. pp. 160–169.
- [14].M.K. Dey An evaluation of risk methods for prioritizing fire protection features: a procedure for fire barrier penetration seal (2004) Nuclear Engineering and Design Volume 232, Issue 2. pp. 165–171.
- [15].Qing Dong, Fei You, Shi-qiang Hu Investigation of Fire Protection Status for Nanjing Representative Historical Buildings and Future Management Measures (2014) Procedia Engineering Volume 71. pp. 377–384.

- [16].ZuoJiaxu, Shi Qiang, Li Juan, Fu Zhiwei, Song Wei, Chen Jiayun, Zhang Chunming, Chai Jianshe The Performance-Based Fire Protection in the Nuclear Power Plant Design (2012) Procedia Engineering Volume 43.pp. 318–323.
- [17].MA Qian-li, HUANG Ting-lin Analysis of and Study on the Difficulties in the Fire Protection Design of Large Commercial Complex (2011) Procedia Engineering, Volume 11. pp. 302–307.
- [18].Страхов В.Л., Гаращенко А.Н. Огнезащита строительных конструкций: современные средства и методы оптимального проектирования // Строительные материалы. 2002. №6. С. 2-5.
- [19].Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф. Огнезащита строительных конструкций / Под ред. Ю.А. Кошмарова. М.: ТИМП, 2000. 433 с.
- [20].Перспективы металла как строительного материала //Инженерно-строительный журнал. 2015. №2(54). С. 4-5.
- [21].Кривцов Ю.В., Ламкин О.Б., Рубцов В.В., Габдулин Р.Ш. Тонкослойная огнезащита бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2006. №6. С. 42-43.
- [22].Багрова М.А. Современные методы огнезащиты стальных конструкций // Наука и современность. 2011. №10-1. С.9-14.
- [23].Давыдкин Н.Ф., Каледин В.О., Страхов В.Л.. Проектирование огнезащиты стальных сжатых конструкций (на примере распорок подземных сооружений) // Пожарная безопасность в строительстве. 2011 г. С. 24-31.
- [24].Яковлев А.И. Методика расчёта пределов огнестойкости металлических конструкций: Огнестойкость строительных конструкций // Сборник трудов № 8. М.: ВНИИПО МВД СССР, 1980. С 19-27.
- [25].Яковлев А.И. О расчётах огнестойкости стальных конструкций на основе применения ЭВМ: Огнестойкость строительных конструкций // Сборник трудов № 1. М.: ВНИИПО МВД СССР, 1973. С 3-18.
- [26].Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. С. 96.
- [27].Автоматизированное проектирование зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2010. №3. С. 2.
- [28].Агафонова В.В. Численное моделирование при оценках огнестойкости стальных конструкций с применением огнезащиты из вермикулитовых плит // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. №8 (145). С. 173-177.
- [29].Федоренко В.С. Исследование огнестойкости стальных центрально сжатых колонн: дис. канд. тех. наук. М.: Моск. инж.-строит. ин-т. им. В.В. Куйбышева, 1961. 215 с.

Fire Resistance Numerical Modeling on the Example of Metal Structures

A.V. Bardin¹, O.Yu. Sudar²

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

ARTICLE INFO

scientific article

doi:

Article history

Received 13.05.2015

Keywords

Numerical modeling;
fire resistance;
ANSYS;
metal structures;
structural fire protection;

ABSTRACT

This article discusses the problem of the fire resistance modeling of metal structures. The paper deals the validity of the modeling results and their application in practise. The study was conducted in the program complex ANSYS. The aim of the work was to determine the future tasks of modeling such as expandable fire protective coatings.

¹ *Corresponding author:*

+7 (931) 354 6847, kmbav@gmail.com (Aleksei Vladimirovich Bardin, student)

² +7 (906) 241 0130, SudarOlga@mail.ru (Olga Yuryevna Sudar, master student)

References

- [1]. Romanenkov I.G., Levites F.A. Ogneshchita stroitelnykh konstruksiy. M.: Stroyizdat, 1991. 320 s.
- [2]. Gogoberidze N.V., Blagorodova N.V. K voprosu avtomatizatsii sistemy opredeleniya predela ognestoykosti stroitelnykh konstruksiy // Inzhenernyy vestnik dona. 2012. №4-1 (22). S. 100-103.
- [3]. Agafonova V.V. Chislennoye modelirovaniye pri otsenkakh ognestoykosti stalnykh konstruksiy s primeneniyyem ogneshchity iz vermikulitovykh plit // Izvestiya yuzhnogo federalnogo universiteta.tekhnicheskiye nauki. 2013. №8 (145).S. 173-177.
- [4]. Ivanov A.V. Vybor i opredeleniye parametrov fizicheskikh sootnosheniy modeley sploshnykh sred, opisyvayushchikh fiziko-mekhanicheskiye svoystva staley pri vysokikh gomologicheskikh temperaturakh // Tezisy dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Mashinostroitelnyye tekhnologii", 16-17 dekabrya 2008. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2008. S. 138-139.
- [5]. Mouritz A.P., Feih S., Kandare E., Gibson A.G. Thermal–mechanical modelling of laminates with fire protection coating (2013) Composites Part B: Engineering, Vol. 48. pp. 68-70.
- [6]. YaqiangJiang, PanagiotisKotsovinos, Asif Usmani, Guillermo Rein, Jamie Stern-Gottfried Numerical Investigation of Thermal Responses of a Composite Structure in Horizontally Travelling fires Using OpenSees (2013) Procedia Engineering Vol. 62. pp. 736-744.
- [7]. Outinen J., Samec J., Sokol Z. Research on Fire Protection Methods and a Case Study "Futurum" (2012) Procedia Engineering Volume 40. pp. 334-340.
- [8]. Zheng Wei Application of Computer Simulation Technology [CST] in Buildings' Performance-Based Fire Protection Design (2012) Procedia Engineering Volume 37. pp. 25–30.
- [9]. Guo-Qiang Lia, Wei-Yong Wang, Su-Wen Chen A simple approach for modeling fire-resistance of steel columns with locally damaged fire protection (2009) Engineering Structures, Vol. 31, Iss. 3. pp. 617-632.
- [10]. Gian-Luca F. Porcari, EhabZalok, Waleed Mekky Fire induced progressive collapse of steel building structures: A review of the mechanisms (2015) Engineering Structures Volume 82. pp. 261–267.
- [11]. David Rush, Luke Bisby, Martin Gillie, Allan Jowsey, Barbara Lane Design of intumescent fire protection for concrete filled structural hollow sections (2014) Fire Safety Journal Volume 67. pp. 13–23.
- [12]. Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han Construction application of Fibre/Mesh method for protecting concrete columns in fire (2011) Construction and Building Materials Volume 25, Issue 6. pp. 2928–2938.
- [13]. Arshad Ahmad, Siti Ayesah Hassan, Adnan Ripin, Mohamad W. Ali, Saharudin Haron A risk-based method for determining passive fire protection adequacy (2013) Fire Safety Journal Volume 58. pp. 160–169.
- [14]. M.K. Dey An evaluation of risk methods for prioritizing fire protection features: a procedure for fire barrier penetration seal (2004) Nuclear Engineering and Design Volume 232, Issue 2. pp. 165–171.
- [15]. Qing Dong, Fei You, Shi-qiang Hu Investigation of Fire Protection Status for Nanjing Representative Historical Buildings and Future Management Measures (2014) Procedia Engineering Volume 71. pp. 377–384.
- [16]. ZuoJiaxu, Shi Qiang, Li Juan, Fu Zhiwei, Song Wei, Chen Jiayun, Zhang Chunming, Chai Jianshe The Performance-Based Fire Protection in the Nuclear Power Plant Design (2012) Procedia Engineering Volume 43.pp. 318–323.
- [17]. MA Qian-li, HUANG Ting-lin Analysis of and Study on the Difficulties in the Fire Protection Design of Large Commercial Complex (2011) Procedia Engineering, Volume 11. pp. 302–307.
- [18]. Strakhov V.L., Garashchenko A.N. Ogneshchita stroitelnykh konstruksiy: sovremennyye sredstva i metody optimalnogo proyektirovaniya // Stroitelnyye materialy. 2002. №6. S. 2-5.
- [19]. Strakhov V.L., Krutov A.M., Davydkin N.F. Ogneshchita stroitelnykh konstruksiy / TIMR, 2000. 433 s.
- [20]. Prospects for the metal as a construction material (Perspektivy metalla kak stroitel'nogo materiala) // Magazine Of Civil Engineering. 2015. №2(54). S. 4-5.
- [21]. Krivtsov Yu.V., Lamkin O.B., Rubtsov V.V., Gabdulin R.Sh. Tonkosloynaya ogneshchita betona // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2006. №6. S. 42-43.
- [22]. Bagrova M.A. Sovremennyye metody ogneshchity stalnykh konstruksiy // Nauka i sovremennost. 2011. №10-1. S.9-14.
- [23]. Davydkin N.F., Kaledin V.O., Strakhov V.L.. Proyektirovaniye ogneshchity stalnykh szhatykh konstruksiy (na primere rasporok podzemnykh sooruzheniy) // Pozharnaya bezopasnost v stroitelstve. 2011 g. S. 24-31.
- [24]. Yakovlev A.I. Metodika rascheta predelov ognestoykosti metallicheskikh konstruksiy: Ognestoykost stroitelnykh konstruksiy // Sbornik trudov № 8. M.: VNIPO MVD SSSR, 1980. S 19-27.

- [25]. Yakovlev A.I. O raschetakh ognestoykosti stalnykh konstruksiy na osnove primeneniya EVM: Ognestoykost stroitelnykh konstruksiy // Sbornik trudov № 1. M.: VNIPO MVD SSSR, 1973. S 3-18.
- [26]. Yakovlev A.I. Raschet ognestoykosti stroitelnykh konstruksiy. M.: Stroyizdat, 1988. S. 96.
- [27]. Automated design of of buildings and structures (Avtomatizirovannoe proektirovanie zdaniy i sooruzheniy) // Magazine Of Civil Engineering. 2010. №3. S. 2.
- [28]. Agafonova V.V. Chislennoye modelirovaniye pri otsenkakh ognestoykosti stalnykh konstruksiy s primeneniyyem ognezashchity iz vermikulitovykh plit // Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. 2013. №8 (145). S. 173-177.
- [29]. Fedorenko V.S. Issledovaniye ognestoykosti stalnykh tsentralno szhatykh kolonn: dis. kand. tekh. nauk. M.: Mosk. inzh.-stroit. in-t. im. V.V. Kuybysheva, 1961. 215 s.

Бардин А.В., Сударь О.Ю. Огнестойкость металлоконструкций на примере метода численного моделирования // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №8(35). С. 36-47.

Bardin A.V., Sudar O.Yu. Fire Resistance Numerical Modeling on the Example of Metal Structures. Construction of Unique Buildings and Structures, 2015, 8(35), Pp. 36-47. (rus)