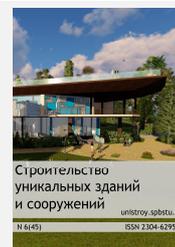


Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spb.ru



Моделирование пожарной нагрузки на конструкции в программном комплексе ANSYS

А.В. Бардин ^{1*}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Информация о статье

УДК 699.81

История

Подана в редакцию 8 апреля 2016

Ключевые слова

ANSYS;
пожарная нагрузка;
предел огнестойкости;
нагрев конструкций;
металлические конструкции;

АННОТАЦИЯ

Широкое применение средств автоматизированного проектирования зданий и сооружений позволяет решать сложные проектные задачи, одной из которых является задача определения пределов огнестойкости конструкций. Целью исследования является анализ распределения температурных полей по сечению элемента и определение сходимости получаемых результатов с существующими методиками определения предела огнестойкости. В статье рассматривается моделирование прогрева металлической конструкции в условиях воздействия температурного нагружения отвечающего температурно-временной кривой стандартного пожара. По результатам исследования получены данные о сходимости результатов численного моделирования с натурными огневыми испытаниями и определены дальнейшие направления деятельности.

Содержание

1.	Введение	56
2.	Обзор литературы	56
3.	Цель и задачи исследования	57
4.	Расчетная модель	58
5.	Выводы	62

Контактный автор:

1*. +7(931)3546847, kmbav@gmail.com (Бардин Алексей Владимирович, студент)

1. Введение

Динамичное развитие строительной отрасли и комплекса предприятий, трудящегося для ее обеспечения, создает плодородную почву для развития и активного внедрения новых типов конструкций и внедрения новых видов материалов в типовые и уникальные решения, применяемых в современном строительстве.

При проектировании и возведении уникальных зданий и сооружений применяются различные конструкции и материалы, основными критериями при выборе которых являются цена, прочность, простота изготовления и монтажа, стойкость к различного рода воздействиям [1-2]. К ним относятся различные бетоны, дерево, сталь, композитные материалы и т.д.

Одновременно с этим конструктивные материалы и выполненные из них элементы конструкций должны обладать заданными противопожарными характеристиками. Данное требование продиктовано обеспечением сохранности конструкций и их прочностных свойств при огневом воздействии пожара [3].

Таким образом на передний план выходит выявление требуемых параметров огнестойкости и огнезащиты конструкций и методик их экспериментального и теоретического определения [4].

Возникновение пожара всегда связано с большим ущербом, причиненным жизни и имуществу. В последнее время в России наблюдается устойчивое количество пожаров, зарегистрированных за год пожарно-спасательными отрядами МЧС РФ. Статистика по пожарам, произошедшим в Российской Федерации за последние 5 лет, представлена на рисунке 1.

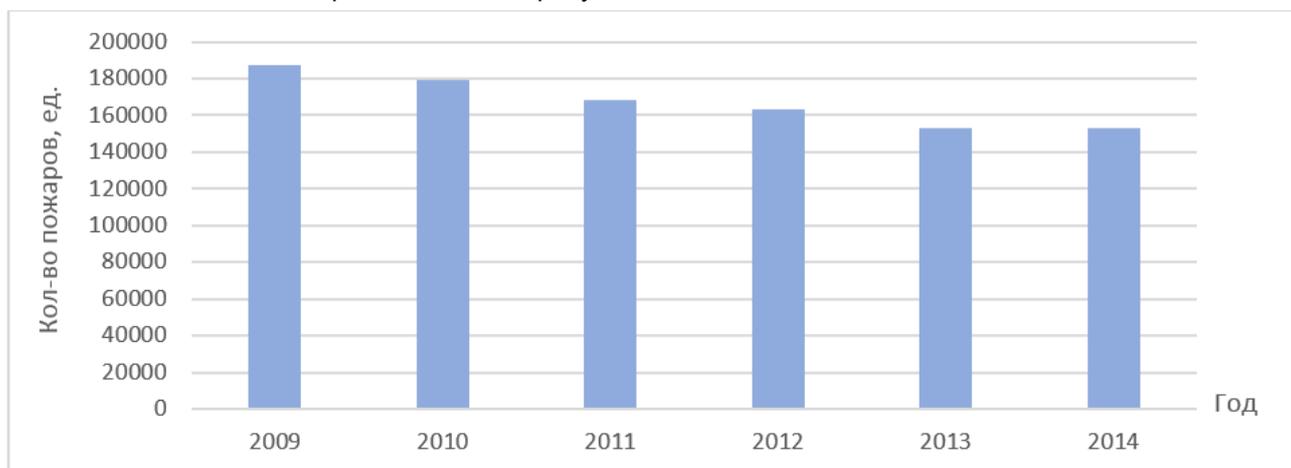


Рисунок 1. Статистика по количеству пожаров в РФ за период с 2009 по 2014 годы

За 2014 год количество пожаров составило 153 002 единицы с общим ущербом 18,723 млрд. рублей по данным МЧС РФ. Из них причины возгорания, относящиеся к ненамеренной порче имущества, а именно возгорание материалов и иные причины (замыкания электропроводки и т.д.) пожара занимают вторую и третью позицию в ежегодном отчете МЧС РФ по статистике пожаров [5].

Исходя из представленных данных, становится очевидно, что проблема пожаров и нанесенного ими ущерба, опирается не только на форс-мажорные факторы, но и на недочеты в проектных решениях зданий и сооружений.

2. Обзор литературы

В настоящее время, при строительстве зданий и сооружений преимущественно используются «классические» материалы, такие как кирпич, бетон, сталь, дерево и др. Каждый из них обладает своим перечнем характеристик и массовостью применения в объектах гражданского и промышленного строительства.

В разрезе свойств огнестойкости бетоны обладают смешанными характеристиками. С одной стороны, при нагреве в диапазоне температур до 200 °С наблюдается незначительное увеличение прочностных свойств конструкции, с другой, невозможно точно зафиксировать данный факт. При температурах, находящихся в переделах 520-800 °С, бетоны имеют незначительную прочность [6-12].

В отличие от бетонов, стальные конструкции теряют свою прочность при нагреве свыше 500°С, становясь пластичными и стремятся к потере устойчивости элементов конструкции и разрушению сооружения. Пример деформации стальных балок представлен на рисунке 2. Данные исследования в своих работах проводили коллективы авторов David Rush и др., Young-Sun Neo и др., В.С. Федоренко, К.Л. Ерохов, М.А. Багрова [13-15].



Рисунок 2. Результаты огневого воздействия на металлические балки перекрытия [16]

Таким образом, вопросы моделирования пожарной нагрузки и определение огнестойкости стальных конструкций как наиболее распространенных в промышленном и гражданском строительстве являются перспективным направлением научной деятельности.

На сегодняшний день, расчет огнестойкости конструкций ведется по методике профессора Яковлева А.И. [17], но данная методика сводится к определению огнестойкости только линейных элементов конструкций, как наиболее просто анализируемых, при этом вопрос огнестойкости узлов сопряжения элементов конструкций, а также их поведение в ходе воздействия пожара остается неосвещенным.

Интерес к научным изысканиям в области численного моделирования воздействия пожара, теплопереноса и вопросов поведения конструкций в таких условиях проявляется зарубежными и отечественными учеными и отражен в работах коллектив авторов Гогоберидзе Н.В и др. [18], Агафонова В.В. [19-20], коллективы авторов Mouritz A.P. и др. [21], Outinen J. и др. [22], Gian-Luca F. Porcari и др. [23].

Широкое распространение BIM моделирования, а также применение расчетных комплексов позволяют взглянуть на вопросы огнестойкости конструкций под новым углом. Применение современных программных комплексов позволяет изучать работу сложных по форме и сечению конструкций в различных условиях их работы, в том числе и в условиях пожарного воздействия [24].

Одними из наиболее распространенных программных комплексов, в которых реализованы модели термо- и аэродинамики потока и теплопередачи, являются программные комплексы ANSYS и AutoCad CFD.

Важно также уточнить, что основными моделями, позволяющими производить моделирование пожара, являются так называемые полевые или дифференциальные модели пожара, в английской терминологии данный термин обозначается аббревиатурой CFD и расшифровывается как Computational Fluid Dynamics. Данные модели используют дифференциальные уравнения в частных производных, описывающих пространственно-временное распределение температур и скоростей газовой среды в помещении, концентраций компонентов газовой среды (кислорода, продуктов горения и т.д.), давлений и плотностей. Эти уравнения включают реологический закон Стокса и закон теплопроводности Фурье [25].

3. Цель и задачи исследования

По результатам проведенного анализа нормативной и научной литературы были определены следующие задачи:

1) Провести моделирование прогрева рассматриваемой конструкции по стандартной температурной кривой газовой среды в условиях пожара и проанализировать полученные картины распределения температур;

2) Определить сходимость метода определения предела огнестойкости по приведенной толщине металла с результатом моделирования.

4. Расчетная модель

На примере металлической балки рассмотрим процесс прогрева элемента во времени до достижения им критической температуры и сравним полученный результат с табличными значениями огнестойкости конструкции без защиты согласно Пособию по определению пределов огнестойкости [26].

В качестве испытуемой конструкции рассмотрим металлическую двутавровую балку 25Б1 длиной 3,0 м, сталь С245, являющейся частью перекрытия здания IV степени огнестойкости (предел огнестойкости конструкций REI 15, огнезащитное покрытие не требуется).

Граничные условия: температура окружающей среды принимается равной 20°C, нагрев балки будет производиться согласно стандартной температурной кривой газовой среды в условиях пожара (см. рисунок 3, [27]). Пожарная нагрузка будет моделироваться в препроцессоре Transient Thermal посредством приложения к обогреваемым поверхностям температурного нагружения, изменяющегося по времени. Из рисунка 3 были выбраны значения температуры газовой среды для каждой минуты от начала испытания.

Выборка дынных представлена в таблице 1.

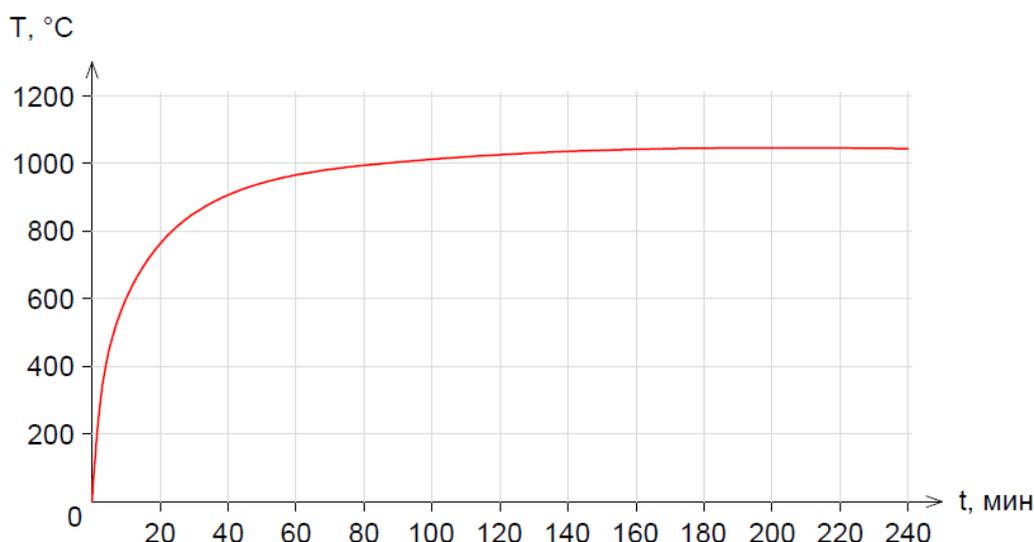


Рисунок 3. Стандартная температурная кривая газовой среды в условиях пожара

Таблица 1 – Выборка данных температуры газовой среды по времени испытания согласно стандартной кривой

Шаг нагружения	T, °C	Время от начала эксперимента, мин	Шаг нагружения	T, °C	Время от начала эксперимента, мин
0	20,0	0	540	594,8	9
1	20,0	0	600	617,2	10
60	138,0	1	660	621,0	11
120	254,6	2	720	641,7	12
180	338,0	3	780	660,5	13
240	417,9	4	840	678,1	14
300	465,2	5	900	694,4	15
360	504,5	6	960	709,7	16
420	538,0	7	1020	724,5	17
480	567,1	8	1080	737,4	18

Моделирование балки производилось в препроцессоре Design Modeler, последующее разбиение на сетку конечных элементов производилось в препроцессоре Mechanical. Общий вид расчетной модели представлен на рисунке 4. Количество конечных элементов – 3398 шт. [28-29].

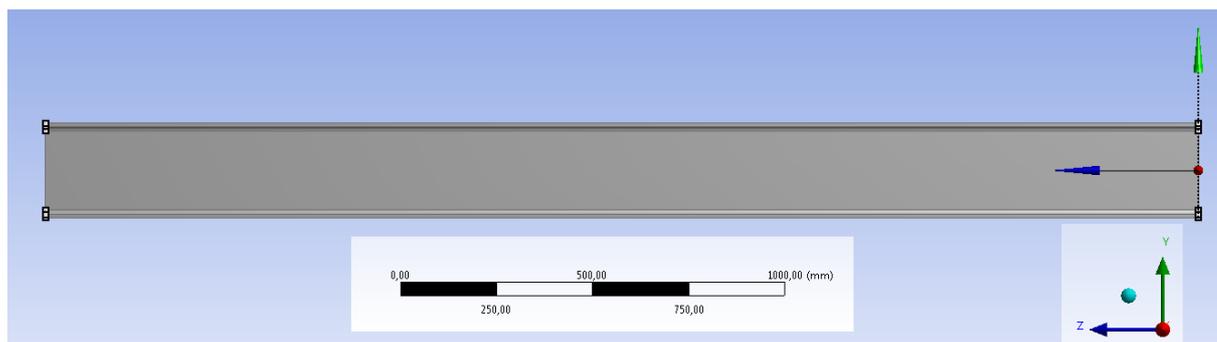


Рисунок 4. Общий вид расчетной схемы

Расчетная схема рассматриваемой задачи представлена на рисунке 5.

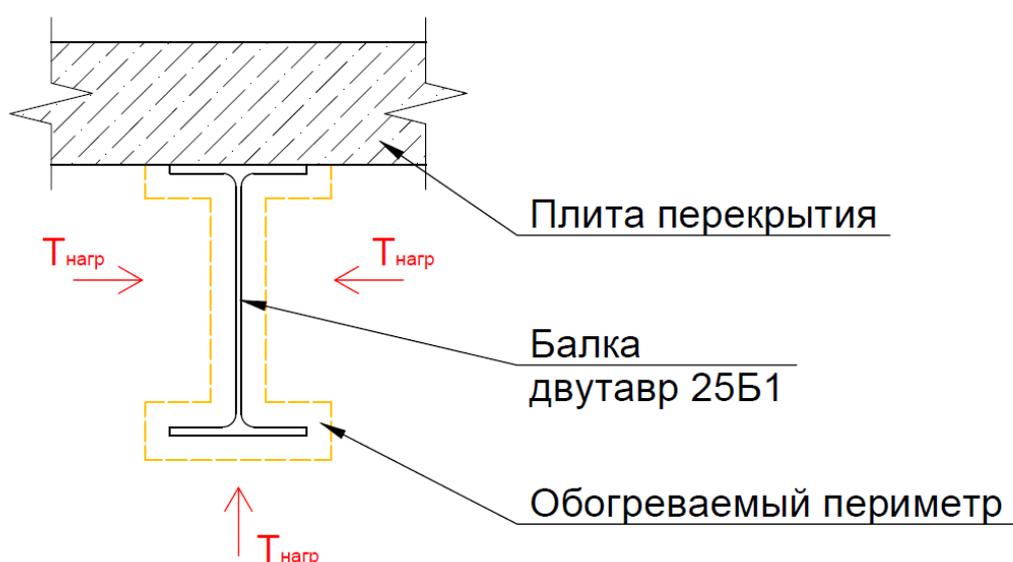


Рисунок 5. Расчетная схема

Согласно пособию по определению пределов огнестойкости конструкций [16], предел огнестойкости зависит от приведенной толщины металла t_{red} , которая вычисляется по формуле:

$$t_{red} = \frac{A}{u}, \quad (1)$$

где A – площадь поперечного сечения, $см^2$. $A = 32,68 \text{ см}^2$;
 u – обогреваемая часть периметра сечения, $см$. $u = 83,74 \text{ см}$.

Результаты моделирования задачи на 1, 4, 7.5 минутах (шаги нагружения 1-450) представлены на рисунках 7-9. График прогрева балки представлен на рисунке 6.

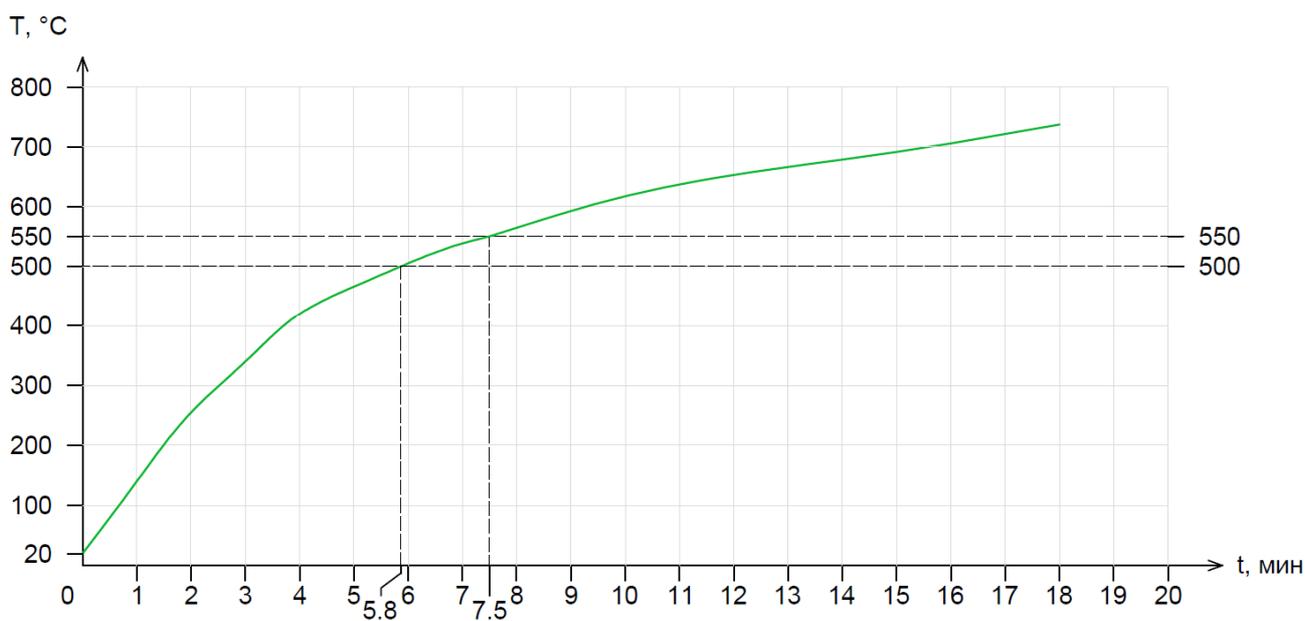


Рисунок 6. Температурная кривая прогрева балки 25Б1

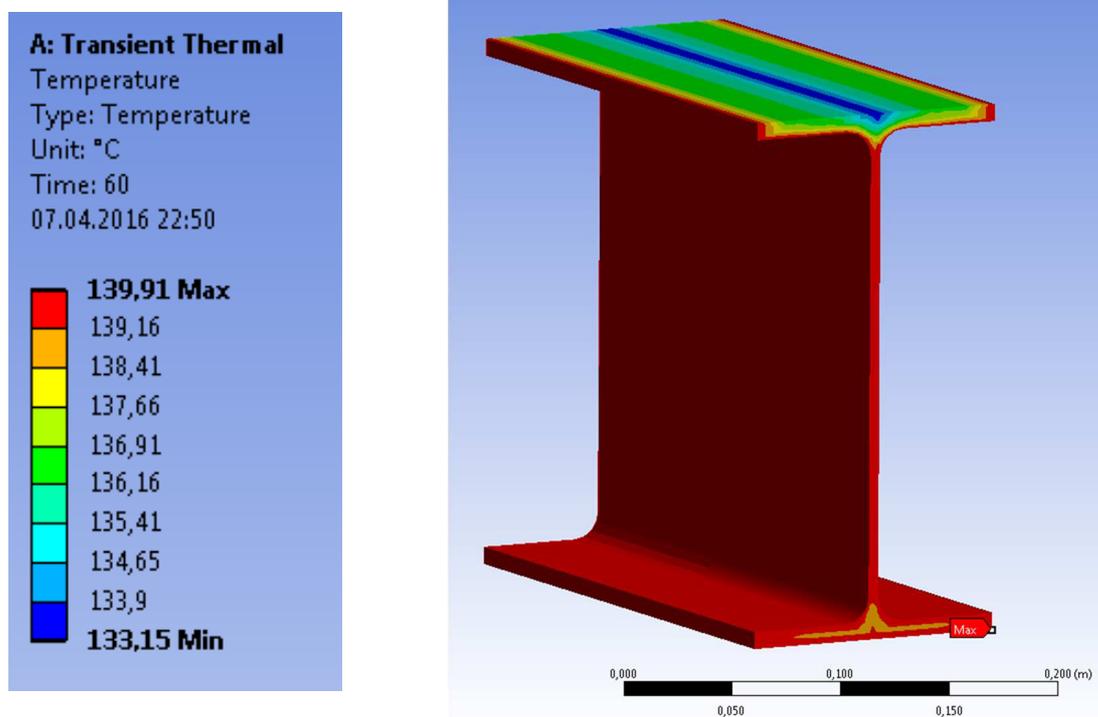


Рисунок 7. Температурные поля, время от начала прогрева – 1 минута

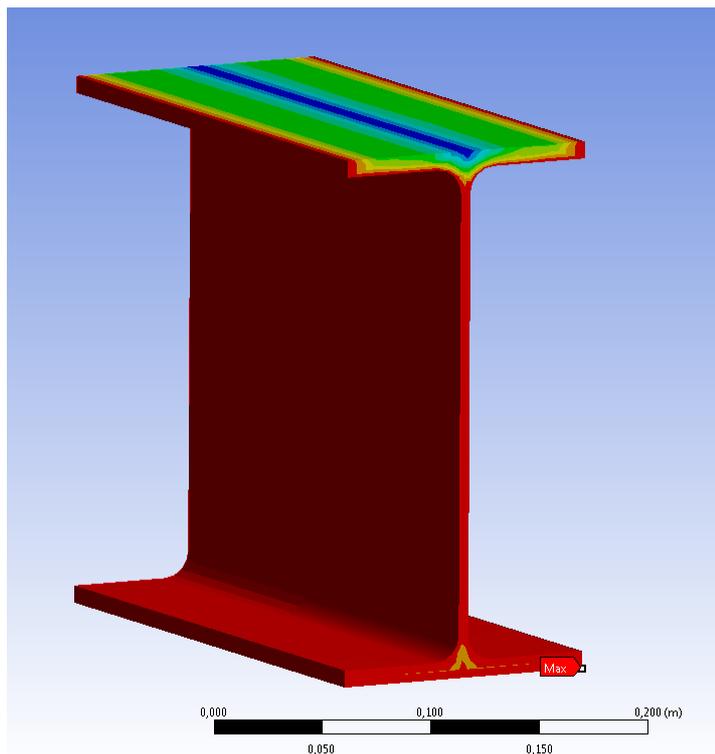
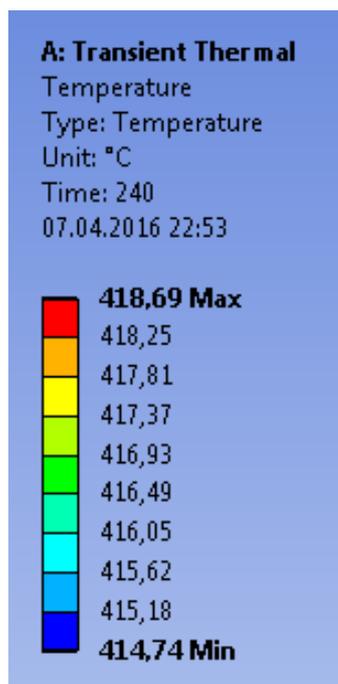


Рисунок 8. Температурные поля, время от начала прогрева – 4 минуты

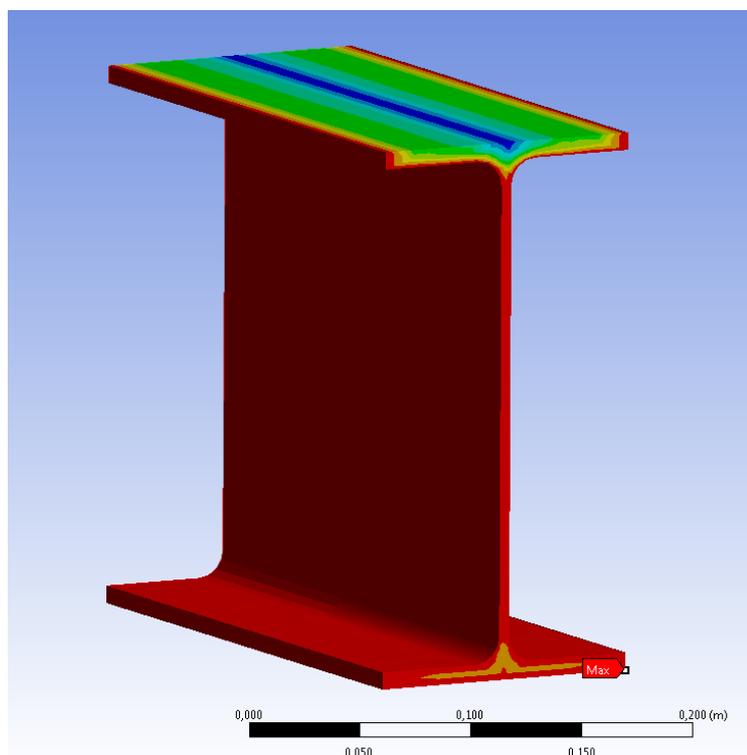
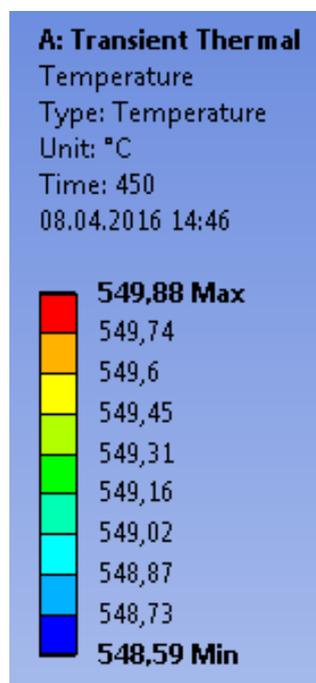


Рисунок 9. Температурные поля, время от начала прогрева – 7.5 мин., достижение критической температуры

Результатом моделирования прогрева балки в условиях обогрева ее газовой средой со стандартной температурной кривой являются изополя распределения температур по сечению балки.

На рисунках 7-9 можно наблюдать незначительную разницу между максимальным и минимальным значением температуры поверхности рассматриваемого элемента. Вызвано это малой толщиной полки и стенки двутавра, которые прогреваясь с достаточно большой скоростью (температура модели поднялась с 20°C до 139°C в течении одной минуты от начала эксперимента), что заметно по графику прогрева, представленному на рисунке 6.

Также стоит отметить, что наличие необогреваемой части периметра сечения (верхняя плоскость верхней полки) может обеспечить отвод тепла от элемента к вышележащему перекрытию, тем самым обеспечив увеличение предела огнестойкости конструкции, в модели данное условие на рассматривается.

На основании полученных изополей распределения температур по сечению элемента можно сделать вывод, что верхняя и нижняя полка двутавра, а также стенка двутавра, достигают критических температур практически одновременно, что влечет быстрое разрушение конструкции, в силу потери устойчивости балкой.

В ходе моделирования рассматриваемый элемент достиг критического значения температуры 500°C на 5,8 минутах (см. рисунок 6), а значения температуры 550°C на 7.5 минутах от начала эксперимента.

Определим сходимость полученных результатов с существующей методикой определения предела огнестойкости конструкций.

По формуле 1 определим приведенную толщину металла рассматриваемого элемента:

$$\frac{32,68}{83,74} = 0,39 \text{ см}$$

Так как полученное значение лежит между табличными (подпункт 1 таблицы 11 пособия), интерполируем и получаем значение предела огнестойкости конструкции равное 0,13 часа или 7.8 минуты.

Полученное при моделировании время прогрева конструкции до критического значение несколько меньше декларируемого пособием. Невязка результатов моделирования и табличных данных составляет:

$$\frac{7,8 - 7,5}{7,8} \cdot 100 = 3,84\%$$

Значение невязки находится в допустимых пределах, что свидетельствует о хорошей сходимости полученных результатов.

5. Выводы

В ходе проведенных исследований по вопросам моделирования пожарной нагрузки в программном комплексе ANSYS получены следующие результаты:

- 1) Был произведен расчет примерной стальной конструкции на действие пожарной нагрузки и получены картины распределения температурных полей по сечению элемента;
- 2) Произведен анализ распределения температурных полей по сечению элемента;
- 3) Проведено сопоставление результатов моделирования с существующими методами определения пределов огнестойкости конструкций, показавшее хорошую сходимость полученных результатов;
- 4) Данные, полученные при моделировании предела огнестойкости элемента конструкции будут применены при решении более сложных задач моделирования поведения элементов конструкций, анализа карт распределения температур по сечению элемента в условиях пожарного воздействия с учетом передачи тепла элементам, контактирующим с нагреваемой конструкцией.

Литература

- [1]. Якуба О.В., Бардин А.В. Диагонально-сетчатые несущие конструкции в высотных зданиях // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №7(22). С. 82-91.
- [2]. Якубсон В.М. Перспективы металла как строительного материала // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2(54). С. 4-5.
- [3]. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности; Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ; принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.; Одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г. // Российская газета – 2008. – 1 августа.
- [4]. Ройтман В.М. Возникновение и развитие теории стойкости конструкций и зданий при комбинированных особых воздействиях с участием пожара // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 10. С. 7-10.
- [5]. МЧС России Статистика [Электронный ресурс] Систем. требования: Internet Explorer 7 и выше. URL: <http://www.mchs.gov.ru/activities/stats/Pozhari> (дата обращения: 03.03.2016).
- [6]. Ефименко А.З., Ройтман В.М. Исследование влияния температуры на теплопроводность бетонов // Сборник научных трудов Института строительства и архитектуры МГСУ/ Московский Государственный строительный университет. 2008. Выпуск 1. С.22-24.
- [7]. Пушенко А.С. Поведение конструкций из высокопрочного бетона в условиях пожара // Межкафедральный сборник научных трудов «Железобетон, Строительные материалы и технологии в третьем тысячелетии». Вып. 4. 2005. С. 58-62.
- [8]. Пушенко А.С., Зуб Д.В., Лойленко М.И. Влияние высоких температур при пожаре на свойства высокопрочного бетона // Материалы международной научно-практической конференции «Строительство-2007». 2007. С. 138-140.
- [9]. Жуков В.В., Хаджишалапов Г.Н. Исследование влияния начальной влажности керамзитобетона на его прочность и трещиностойкость при нагревании. Госстрой России ВНИИТПИ // Строительство и архитектура. 2004. №3. С. 48-54.
- [10]. 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.
- [11]. 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.
- [12]. 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.
- [13]. Федоренко В.С. Исследование огнестойкости стальных центрально сжатых колонн: дис. канд. тех. наук. М.: Москва. инж.-строит. ин-т. им. В.В. Куйбышева. 1961. 215 с.
- [14]. Ерохов К.Л. Современная огнезащита для строительных конструкций и текстиля // Строительные материалы. 2002 г. №2. С. 14-15.
- [15]. Багрова М.А. Современные методы огнезащиты стальных конструкций // Наука и современность. 2011. №10-1. С.9-14.
- [16]. Hicks S., Feeney M., Clifton G.C. Fire Performance of an Office Building with Long-span Cellular Floor Beams—Britomart East, Auckland // Structural Engineering International. 2015. Volume 22. pp. 533-540.
- [17]. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат. 1988. 143 с.
- [18]. Гогоберидзе Н.В., Благородова Н.В. К вопросу автоматизации системы определения предела огнестойкости строительных конструкций // Инженерный вестник дона. 2012. №4-1 (22). С. 100-103.
- [19]. 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.
- [20]. Агафонова В.В. Численное моделирование поведения стальных строительных конструкций в условиях высокотемпературного воздействия // Конструкции из композиционных материалов. 2013. №4. С. 12-16.
- [21]. 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.
- [22]. Outinen J., Samec J., Sokol Z. Research on Fire Protection Methods and a Case Study “Futurum” (2012) Procedia Engineering Volume 40. pp. 334-340.

- [23]. 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.
- [24]. Якубсон В.М. Автоматизированное проектирование зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2010. №3. С. 2.
- [25]. Брушлинский Н.Н., Корольченко А.Я. Моделирование пожаров и взрывов. М.: Познака. 2000. 492 с.
- [26]. Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов (к СНиП II-2-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: Стройиздат. 1985. 56 с.
- [27]. Испытания при углеводородном горении [Электронный ресурс] Систем. требования: Internet Explorer 7 и выше. URL: http://normatest.net/uglevodorodnoe_gorenie.php (дата обращения: 02.04.2016).
- [28]. Structural Analysis Guide, Documentation for ANSYS, Release 14. 2012.
- [29]. Thermal Analysis Guide, Documentation for ANSYS, Release 14. 2012.

Fire load modeling on the structure in ANSYS

A.V Bardin^{1*}

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia*

ARTICLE INFO

scientific article

doi:

Article history

Received 8 April 2016

Keywords

ANSYS;
fire load;
fire resistance;
heat structures;
metal structures;

ABSTRACT

The behavior of the building structures in case of the fire have many directions for study. The purpose of the research was to create a process of fire impact on the building constructions. In the theoretical part of the study, the main issue was to create method for numerical modeling for standard fire. This study was carried out in transient thermal processor for ANSYS and compared with real fire impact results. The study showed correlation of research data. The results can be applied to solve difficult goals of fireproof for spatial constructions and have use in practice.

Corresponding author:

1*. +7(931)3546847, kmkbav@gmail.com (Aleksei Vladimirovich Bardin, Student)

References

- [1]. Yakuba O.V., Bardin A.V. Diagonal'no-setchatye nesushchie konstruksii v vysotnykh zdaniyakh [Diagrid structural systems for tall buildings] // Construction of Unique Buildings and Structures. 2014. №7(22). S. 82-91. (rus)
- [2]. Yakubson V.M. Perspektivy metalla kak stroitel'nogo materiala // Magazine of Civil Engineering. 2015. № 2(54). pp. 4-5. (rus)
- [3]. Tekhnicheskii reglament o trebovaniyakh pozharной bezopasnosti; Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 22 iyulya 2008 g. № 123-FZ; prinyat Gosudarstvennoy Dumoy 4 iyulya 2008 g.; Odobren Sovetom Federatsii 11 iyulya 2008 g. // Rossiyskaya gazeta – 2008. – 1 avgusta. (rus)
- [4]. Roytman V.M. Vozniknovenie i razvitie teorii stoykosti konstruksiy i zdaniy pri kombinirovannykh osobykh vozdeystviyakh s uchastiem pozhara [The emergence and development of the theory of stability of structures and buildings in combined special effects with fire] // industrial and civil engineering. 2010. № 10. p. 7-10. (rus)
- [5]. MChS Rossii Statistika [Elektronnyy resurs] Sistem. trebovaniya: Internet Explorer 7 i vyshe. URL: <http://www.mchs.gov.ru/activities/stats/Pozhari> (data obrashcheniya: 03.03.2016). (rus)
- [6]. Efimenko A.Z., Roytman V.M. Issledovanie vliyaniya temperatury na teploprovodnost' betonov [Study the effect of temperature on the thermal conductivity of concrete] // Sbornik nauchnykh trudov Instituta stroitelstva i arkhitektury MGSU/ Moskovskiy Gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet. 2008. Vypusk 1. pp. 22-24. (rus)
- [7]. Pushenko A.C. Povedenie konstruksiy iz vysokoprochnogo betona v usloviyakh pozhara [The behavior of structures made of high-strength concrete in fire conditions] // Mezhhafedral'nyy sbornik nauchnykh trudov «Zhelezobeton, Stroitel'nye materialy i tekhnologii v tret'yem tysyacheletii». Vyp. 4. 2005. pp. 58-62. (rus)
- [8]. Pushenko A.C., Zub D.V., Loylenko M.I. Vliyanie vysokikh temperatur pri pozhare na svoystva vysokoprochnogo betona [Effect of high temperatures in the fire on the properties of high strength concrete] // Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Stroitel'stvo-2007». 2007. pp. 138-140. (rus)
- [9]. Zhukov V.V., Khadzhisalapov G.N. Issledovanie vliyaniya nachal'noy vlazhnosti keramzitobetona na ego prochnost' i treshchinostoykost' pri nagrevanii. Gosstroy Rossii VNIINTPI [The study of influence of the initial moisture keramsit his strength and fracture toughness when heated] // Construction and architecture. 2004. №3. pp. 48-54. (rus)
- [10]. 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.
- [11]. 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.
- [12]. 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.
- [13]. Fedorenko V.S. Issledovanie ognestoykosti stal'nykh tsentral'no szhatykh kolonn: dis. kand. tekhn. nauk. [Investigation of fire resistance of steel centrally compressed columns] M.: Moskva. inzh.-stroit. in-t. im. V.V. Kuybysheva. 1961.p. 215. (rus)
- [14]. Erokhov K.L. Sovremennaya ognezashchita dlya stroitel'nykh konstruksiy i tekstilya [Modern fire protection for building structures and textiles] // Construction Materials. 2002. №2. pp. 14-15. (rus)
- [15]. Bagrova M.A. Sovremennyye metody ognezashchity stal'nykh konstruksiy [Modern methods of fire protection of steel structures] // Science and Modernity. 2011. №10-1. pp. 9-14. (rus)
- [16]. Hicks S., Feeney M., Clifton G.C. Fire Performance of an Office Building with Long-span Cellular Floor Beams—Britomart East, Auckland // Structural Engineering International. 2015. Volume 22. pp. 533-540.
- [17]. Yakovlev A.I. Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruksiy [Calculation of fire resistance of building structures]. – M.: Stroyizdat. 1988. p. 143. (rus)
- [18]. Gogoberidze N.V., Blagorodova N.V. K voprosu avtomatizatsii sistemy opredeleniya predela ognestoykosti stroitel'nykh konstruksiy [On the question of the definition of the automation system the fire resistance of building structures] // Inzhenernyy vestnik dona. 2012. №4-1 (22). pp. 100-103. (rus)
- [19]. Agafonova V.V. Chislennoe modelirovanie pri otsenkakh ognestoykosti stal'nykh konstruksiy s primeneniem ognezashchity iz vermikulitovykh plit [Numerical modeling for structural steel fire resistance assessments using the fire protection of the vermiculite boards] // Izvestiya yuzhnogo federal'nogo universiteta. tekhnicheskie nauki. 2013. №8 (145). pp. 173-177. (rus)
- [20]. Agafonova V.V. Chislennoe modelirovanie povedeniya stal'nykh stroitel'nykh konstruksiy v usloviyakh vysokotemperaturnogo vozdeystviya [Numerical modeling of the behavior of structural steel for high temperature exposure] // Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov. 2013. №4. pp. 12-16. (rus)

- [21].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.
- [22].Outinen J., Samec J., Sokol Z. Research on Fire Protection Methods and a Case Study “Futurum” (2012) Procedia Engineering Volume 40. pp. 334-340.
- [23].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.
- [24].Yakubson V.M. Avtomatizirovannoe proektirovanie zdaniy i sooruzheniy [Computer-aided design of buildings and structures] // Magazine of Civil Engineering. 2010. №3. pp. 2. (rus)
- [25].Brushlinskiy N.N., Korol'chenko A.Ya. Modelirovanie pozharov i vzryvov [Simulation of fires and explosions]. M.: Pozhnauka. 2000. p. 492. (rus)
- [26].Posobie po opredeleniyu predelov ognestoykosti konstruktsiy, predelov rasprostraneniya ognya po konstruktsiyam i grupp vozgoraemosti materialov (k SNiP II-2-80) [Manual definition of the limits of fire resistance of structures, limit the spread of fire on structures and groups flammability of materials] / TsNIISK im. Kucherenko. M.: Stroyizdat. 1985.p. 56. (rus)
- [27].Ispytaniya pri uglevodorodnom gorenii [Tests at the hydrocarbon combustion] [Elektronnyy resurs] Sistem. trebovaniya: Internet Explorer 7 i vyshe. URL: http://normatest.net/uglevodorodnoe_gorenie.php (data obrashcheniya: 02.04.2016). (rus)
- [28].Structural Analysis Guide, Documentation for ANSYS, Release 14. 2012.
- [29].Thermal Analysis Guide, Documentation for ANSYS, Release 14. 2012.

Бардин А.В., Моделирование пожарной нагрузки на конструкции в программном комплексе ANSYS // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №6 (45). С.55-67

Bardin A.V., Fire load modeling on the structure in ANSYS. Construction of Unique Buildings and Structures, 2016, 6 (45), Pp. 55-67 (rus)