

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.278>

УДК 614.841.332:624.94.014.2

ОЦЕНКА ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООБМЕНА С ПРИМЫКАЮЩИМИ СМЕЖНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Олесиук Н.М., Писченков И.А.

Цель. На основе экспериментальных исследований и теоретических данных определить теплофизические характеристики вспучивающегося огнезащитного состава и оценить прогрев стальных конструкций со вспучивающейся огнезащитой наружной поверхности с учетом примыкания бетонного покрытия, оценить влияние теплообмена с бетонным покрытием на оптимальную толщину слоя вспучивающегося огнезащитного состава для обеспечения требуемого предела огнестойкости.

Методы. Моделирование в системе конечно-элементного анализа.

Результаты. На основе серии экспериментальных и теоретических исследований в системе конечно-элементного анализа ANSYS решена теплотехническая задача огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой наружной поверхности на основе вспучивающегося состава с учетом примыкания бетонного покрытия. Экспериментальные исследования использованы для оценки эффективных значений теплофизических характеристик вспучивающегося состава путем решения обратной задачи теплопроводности для расчетной конечно-элементной модели с использованием методов параметрической оптимизации. Полученные теплофизические характеристики позволили оценить прогрев стальных конструкций с огнезащитой с учетом теплообмена с бетонным покрытием. В зависимости от требуемого предела огнестойкости и вида рассматриваемых конструкций (перекрытия) и расчетной ситуации при учете теплообмена с бетонным покрытием оптимальная толщина огнезащитного покрытия, обеспечивающая требуемый предел огнестойкости, снижается в 1,2...4,4 раза.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы для решения задач огнестойкости стальных конструкций со вспучивающейся огнезащитой наружной поверхности с учетом теплообмена со смежными строительными конструкциями и элементами при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

Ключевые слова: огнестойкость, вспучивающаяся огнезащита, эффективные теплофизические характеристики, обратная задача теплопроводности, стандартный температурный режим, стальные конструкции, метод конечных элементов.

(Поступила в редакцию 13 июля 2021 г.)

Введение

Одним из нормируемых для строительных конструкций показателей является предел огнестойкости. Основные задачи огнестойкости – обеспечение эвакуации и спасение людей, обеспечение для прибывших подразделений безопасных условий для ликвидации пожара¹. Огнестойкость стальных конструкций, в том числе с огнезащитой, во многом определяется закономерностью прогрева сечения в ходе пожара. В процессе прогрева строительных конструкций может произойти их разрушение, а вследствие чего – гибель людей, а также причинен значительный материальный ущерб. Поэтому обеспечение требуемой огнестойкости указанных конструкций является важной и актуальной задачей.

¹ Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность: ТР 2009/013/ВУ: принят 02.07.2013: вступ. в силу 01.08.2010 / постановление Совета Министров Респ. Беларусь. – Минск: Госстандарт, 2015. – 25 с.

Огнестойкость – способность конструктивной системы, ее части или отдельной конструкции выполнять требуемые функции (несущую и (или) ограждающую) в течение установленной продолжительности регламентируемого пожара при заданном уровне нагрузки². Наступление предельного состояния R стальных конструкций происходит при потере прочности или устойчивости конструкции, что соответствует достижению температуры прогрева стального сечения конструкции критического значения [1]. Для каждого значения критической температуры стали соответствует свое значение коэффициента снижения расчетного предела текучести.

Основная часть

Классически расчетная оценка огнестойкости стальных конструкций осуществляется с использованием табличных данных и упрощенных методов расчета, основанных на расчете теплоемкости системы без учета теплопотерь в смежные конструкции [2; 3]. При этом в ряде нормативных документов допускается использовать более подробные, так называемые общие методы теплотехнического расчета³. Математический аппарат общего метода расчета достаточно сложен и требует решения дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов, которое может быть выполнено с помощью программных комплексов, например ANSYS.

Упрощенные методы и табличные данные в настоящее время широко используются при расчете огнестойкости стальных конструкций, которые могут быть подвержены при пожаре обогреву со всех сторон и для которых нет необходимости получать распределение температур в пределах стального сечения⁴. Для указанных конструкций эти методы дают достаточно хорошее совпадение с результатами экспериментальных исследований их прогрева. В иных случаях требуется использование общего метода расчета.

Оценка прогрева незащищенного стального сечения при пожаре, как правило, не вызывает сложностей, но при этом и не имеет особого смысла, т.к. предел огнестойкости незащищенной конструкции редко когда превышает предел огнестойкости R15. Во всех остальных случаях, где требуется большая огнестойкость, необходимо использовать огнезащиту стальных конструкций. Эффективность огнезащитных средств оценивается экспериментальными либо экспериментально-расчетными методами. Расчетная оценка прогрева стальных сечений в экспериментально-расчетных методах осуществляется на основании теплофизических характеристик огнезащиты, полученных путем решения обратной задачи теплопроводности в диапазоне расчетных температур при рассматриваемом температурном воздействии.

Теплофизические характеристики огнезащиты в дальнейшем используются для определения прогрева стального сечения.

Оценка огнестойкости стальных конструкций предусматривает анализ результатов серии их модельных огневых испытаний с различной толщиной огнезащиты и приведенной толщиной металла⁵. Результаты испытаний посредством решения уравнения регрессии позволяют определить константы, используемые в дальнейшем для расчета времени прогрева

² Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: СН 2.01.03-2019; введ. 08.09.2020. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 43 с.

³ Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1993-1-2-2009 (02250); введ. 10.12.2009. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 77 с.

⁴ Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными облицовками, выполненными из плит КНАУФ-Файерборд ТУ 5742-006-01250242-2009 по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей ТУ 1121-012-04001508-2011: утв. зам. нач. ФГБУ ВНИИПО МЧС России 19.03.2012. – Москва: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2012. – 40 с.

⁵ Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied passive protection products to steel members: BS EN 13381-4:2013. – Ent. 31.05.2013. – London: BSI, 2013. – 88 p.

аналогичных конструкций до критической температуры в зависимости от приведенной толщины металла и толщины огнезащиты.

В строительстве также применяются стальные конструкции с примыкающими смежными железобетонными покрытиями (рис. 1).



Рисунок 1. – Детали конструкции с примыканием бетонного покрытия

Конструкция составного железобетонного перекрытия состоит из стальных стержневых элементов (балок, уголков), листовой стали и бетонного покрытия. Однако, как указано выше, теплообмен с примыкающим бетонным покрытием при оценке прогрева стального сечения не учитывается.

Примыкание смежных элементов, как правило, снижает температуру стального сечения конструкций за счет теплообмена через поверхности контакта. В результате учета теплообмена со смежными элементами значительно изменяется оптимальная толщина огнезащитного покрытия для обеспечения требуемого предела огнестойкости.

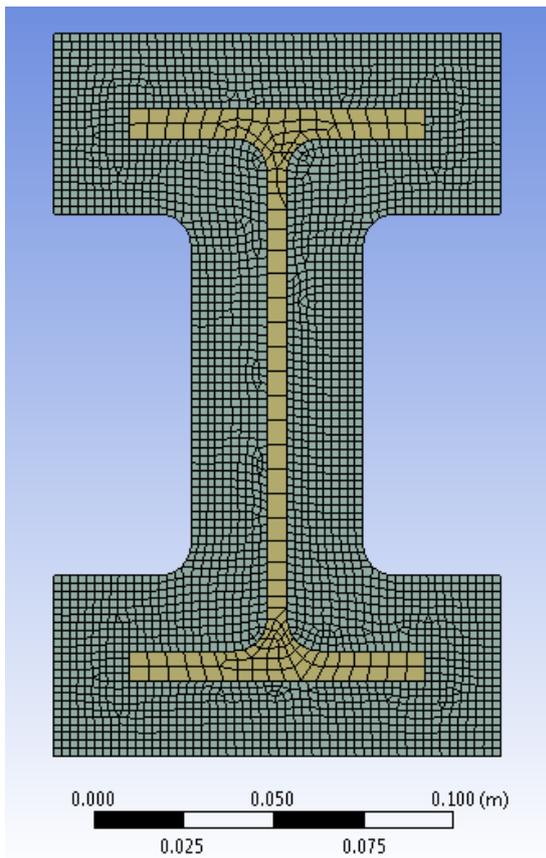
В частности, задача огнезащиты составного перекрытия, состоящего из стального листа, усиленного стальными уголками, и бетонного покрытия поверх него, в упрощенной постановке может быть решена только со значительным запасом как огнезащиты, так и толщины бетонного покрытия. Суммарный эффект огнезащиты для обеспечения предельного состояния EI по огнестойкости, равно как и снижение температуры стального сечения за счет теплопотерь в бетон могут быть определены исключительно общими методами расчета.

Для доказательства наличия снижения температуры стального сечения за счет теплообмена со смежным бетонным покрытием для указанного составного перекрытия были решены следующие задачи:

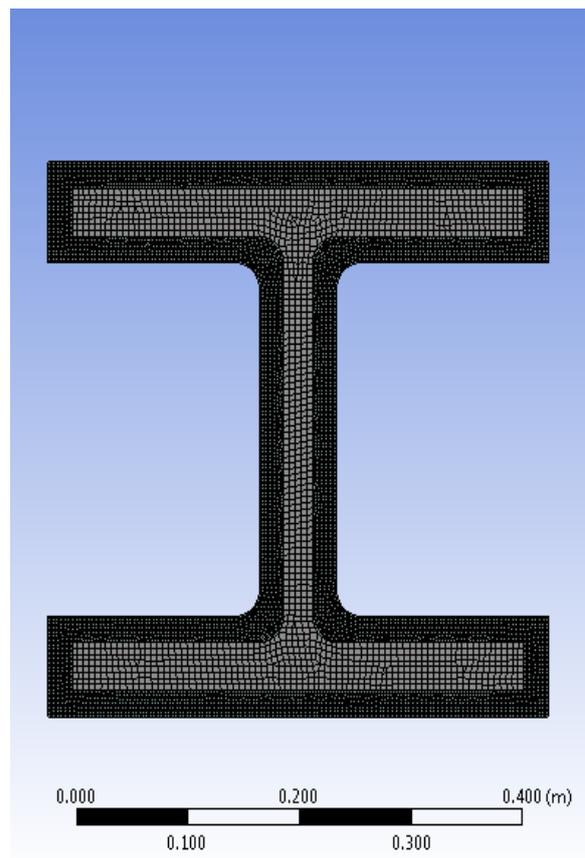
1. Разработаны модели стальных огнезащищенных конструкций в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS, идентичные испытанным. Примеры разработанных моделей приведены на рисунке 2.

Определены эффективные теплофизические характеристики вспучивающейся огнезащиты путем решения обратной задачи теплопроводности для серии экспериментальных исследований с использованием общих методов расчета в конечно-элементной модели. Серия экспериментальных исследований состояла из набора стальных колонн и балок двутаврового сечения с различной приведенной толщиной металла от 3,4 до 17,0 мм.

2. Разработаны модели 4 видов составного перекрытия, пример одной из моделей представлен на рисунке 3. Решена прочностная задача с определением критической температуры стального сечения.



Расчетная модель конструкции с приведенной толщиной металла 3,4 м и толщиной вспучивающегося огнезащитного покрытия 1,052 мм



Расчетная модель конструкции с приведенной толщиной металла 17 м и толщиной вспучивающегося огнезащитного покрытия 1,081 мм

Рисунок 2. – Модели стальных стержневых огнезащищенных конструкций со вспучивающимся покрытием

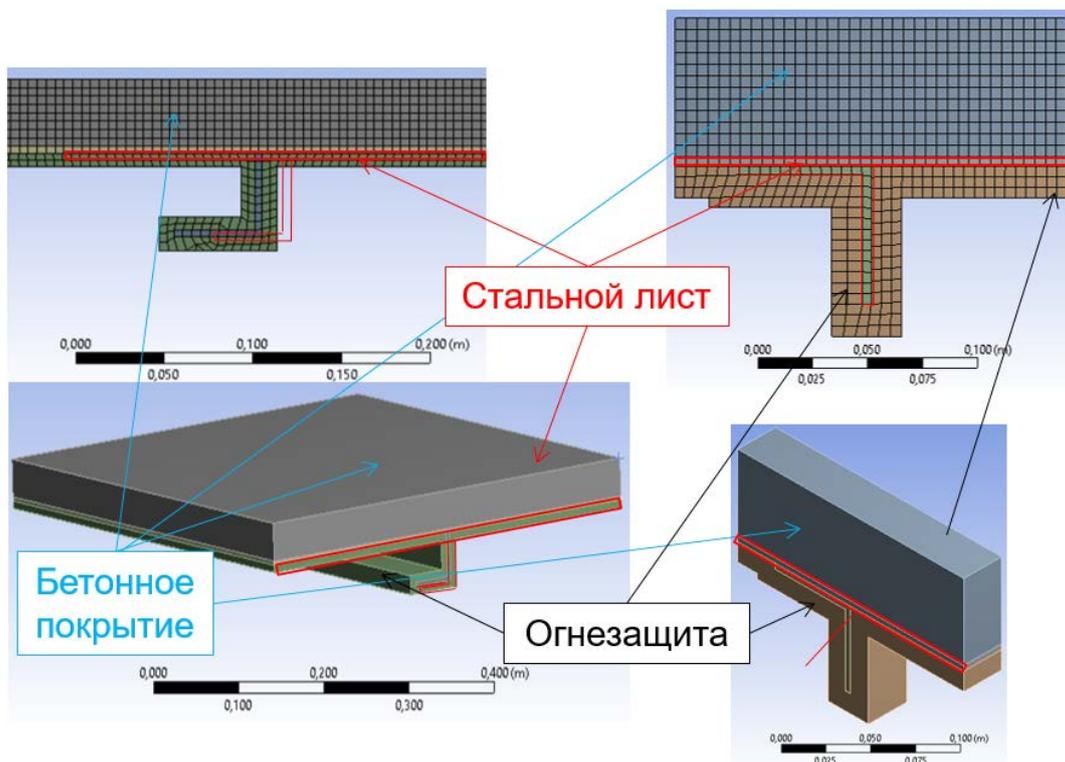


Рисунок 3. – Модель составного перекрытия

3. Для 4 видов составного перекрытия, включающих стальные сечения с различной приведенной толщиной металла и критической температурой, решены 4 вида задач прогрева при стандартном температурном воздействии длительностью 30, 45 и 60 мин с различными граничными условиями (соответствующими в разной степени как упрощенной, так и общей расчетной модели):

3.1) без учета теплоотдачи в бетон (теплота от пожара аккумулируется исключительно стальным сечением – соответствует формулировке упрощенных методов расчета);

3.2) с косвенным учетом теплоотдачи в бетон (при этом поверхность контакта стального сечения с бетоном охлаждается как необогреваемая поверхность);

3.3) с учетом теплоотдачи в бетон (теплота от пожара аккумулируется как стальным, так и бетонным сечением, без учета теплопотерь с необогреваемой поверхности);

3.4) с учетом теплоотдачи в бетон (теплота от пожара аккумулируется как стальным, так и бетонным сечением, а также учитываются теплопотери с необогреваемой поверхности – соответствует формулировке общих методов расчета).

Для каждого вида задач прогрева решена оптимизационная задача и определена минимально допустимая толщина вспучивающегося огнезащитного покрытия исходя из данных экспериментальных исследований и максимального приближения температуры сечения к критической.

На основании результатов проведения серии экспериментальных исследований прогрева стальных огнезащищенных конструкций были проанализированы зависимости температуры стального сечения испытанных образцов от времени огневого воздействия.

Следует отметить, что кривые прогрева исследуемых конструкций при проведении огневых испытаний можно условно разделить на два участка. Точка перегиба соответствует процессу активного вспучивания огнезащитного покрытия в температурных диапазонах от 200 до 250 °С с последующим замедлением прогрева. Замедление прогрева обусловливается несколькими факторами: поглощением теплоты огнезащитным покрытием в результате его термического разложения и уменьшением теплопроводности покрытия за счет увеличения его пористости и образования пенококса [4].

В дальнейшем данные результаты прогрева стальных огнезащищенных конструкций были использованы при определении теплофизических характеристик огнезащитного состава.

Определение эффективных теплофизических характеристик огнезащитного состава проводили с использованием системы конечно-элементного анализа ANSYS, включало:

– разработку расчетных конечно-элементных моделей конструкций с огнезащитой наружной поверхности с формулировкой начальных и граничных условий;

– оценку эффективных значений теплофизических характеристик вспучивающегося состава путем решения обратной задачи теплопроводности для расчетной конечно-элементной модели с использованием метода последовательных итераций.

Расчетная модель принята составной из двух частей, первая часть – двутавровое сечение, вторая часть – огнезащитный состав. В ходе моделирования фрагмент разбивался на конечные элементы призматической формы с максимальным размером грани для металла 5 мм, для огнезащитного покрытия – 2 мм.

Во время огневого воздействия толщина огнезащиты изменяется практически на всей продолжительности пожара. Ввиду сложности процесса моделирования изменения толщины огнезащитного состава для упрощения модели изменением геометрических размеров вспученного состава пренебрегали, при этом толщину огнезащиты в расчетной модели задавали постоянной (во вспученном состоянии) с коэффициентом вспучивания, равным 20. Таким образом, процесс вспучивания учитывался косвенным образом за счет изменения эффективных теплофизических характеристик огнезащиты. Эффективная теплопроводность вспучивающегося огнезащитного покрытия определялась исходя из следующих расчетных упрощений:

- изменением температуры по высоте экспериментальной конструкции пренебрегали, поэтому расчетные модели приняты двумерными;
- теплофизические характеристики стали принимали согласно ТКП EN 1993-1-2-2009⁶;
- значение удельной теплоемкости вспучивающегося огнезащитного состава принято постоянным и равным 5000 Дж/(кг×К);
- значение плотности вспучивающегося огнезащитного состава принято постоянным (100 кг/м³);
- при определении теплового потока, поглощенного поверхностью конструкции, учитывался теневой эффект. Теневой эффект учтен посредством снижения теплового потока за счет поправочного коэффициента. Поправочный коэффициент для учета влияния теневого эффекта определен согласно положениям ТКП EN 1993-1-2-2009⁷.

Для определения эффективных теплофизических характеристик вспучивающегося огнезащитного состава для разработанных расчетных конечно-элементных моделей стальных конструкций с огнезащитой определены:

- 1) начальные условия: температура в расчетном сечении одинакова и равна температуре окружающей среды;
- 2) граничные условия (для теплообмена между газовой средой пожара и наружной поверхностью конструкций граничные условия приняты 3-го рода, для теплообмена между огнезащитным составом и стальной конструкцией – 4-го рода):
 - температура греющей среды принята равной изменению среднеобъемной температуры газовой среды в печи при проведении огневых испытаний;
 - коэффициент теплоотдачи конвекцией от нагревающей среды к поверхности конструкции с равен⁸ 25 Вт/(м²×К);
 - степень черноты поверхности материалов принята равной 0,8 для огнезащитного состава⁹, 0,7 для стали¹⁰ и 1,0 для пламени¹¹ (греющей среды);
 - для контура примыкания огнезащитного состава к стальному сечению принят идеальный тепловой контакт (равенство плотности теплового потока для двух тел);

Поправочный коэффициент для учета влияния теневого эффекта определялся согласно 4.2.5.1(2) ТКП EN 1993-1-2-2009¹².

На этапе оценки эффективных значений теплофизических характеристик вспучивающегося состава для конструкций путем решения обратной задачи теплопроводности для расчетной конечно-элементной модели с использованием методов параметрической оптимизации были приняты следующие расчетные предпосылки:

- 1) плотность стали ρ_a принята независимой от ее температуры и равна 7850 кг/м³;
- 2) значения теплофизических характеристик стали приняты согласно Еврокоду¹³.

Процесс параметрической оптимизации для эффективного коэффициента теплопроводности заключается в проведении итерационного расчета с последовательным уточнением зависимости коэффициента теплопроводности материала огнезащиты от температуры до момента удовлетворительной сходимости расчетных и экспериментальных данных прогрева стального сечения. Расхождение экспериментальных и расчетных значений температуры стального сечения, защищенного огнезащитным покрытием, составляет: толщиной

⁶ См. сноску 3.

⁷ См. сноску 3.

⁸ См. сноску 2.

⁹ См. сноску 2.

¹⁰ См. сноску 2.

¹¹ См. сноску 3.

¹² См. сноску 3.

¹³ См. сноску 3.

0,358–0,447 мм от 5 до 90 °С; толщиной 1,052–1,581 мм от 5 до 40 °С (расчетные значения температур в диапазоне от 350 до 800 °С находятся выше, чем экспериментальные, что идет в запас огнестойкости). Это свидетельствует о возможности использования разработанных расчетных моделей для прогнозирования прогрева стальных конструкций вспучивающимся огнезащитным составом.

Принято, что при моделировании прогрева стальных конструкций со вспучивающейся огнезащитой наружной поверхности с учетом примыкания смежных элементов наступление предела огнестойкости стальной конструкции происходит при прогреве расчетного сечения конструкции до критической температуры.

При разработке моделей для каждой из них установлены:

1) начальные условия: температура в расчетном сечении одинакова и равна температуре окружающей среды;

2) граничные условия (для теплообмена между газовой средой пожара и поверхностью конструкции, подвергнутой огневому воздействию, граничные условия приняты 3-го рода; для теплообмена между материалами, примыкающими друг к другу, – 4-го рода; для учета охлаждения моделируемой конструкции перекрытия с его необогреваемой поверхности в окружающую среду – 3-го рода с коэффициентом теплообмена 9 Вт/м^2)¹⁴:

– температура греющей среды принята равной изменению стандартного температурного режима¹⁵;

– коэффициент теплоотдачи конвекцией от нагревающей среды к поверхности конструкции равен¹⁶ $25 \text{ Вт/(м}^2 \times \text{К)}$;

– степень черноты поверхности материалов принята равной 0,8 для огнезащитного состава¹⁷, 0,7 для стали¹⁸, 0,7 для бетона¹⁹ и 1,0 для пламени²⁰ (греющей среды);

– для контура примыкания огнезащитного состава к стальному сечению принят идеальный тепловой контакт (равенство плотности теплового потока для двух тел);

– потерями тепла по торцам конструкции (по длине) пренебрегали (тепловой поток принят равным нулю), в запас безопасности.

Результаты моделирования прогрева стальных конструкций со вспучивающимся огнезащитным покрытием с учетом теплопередачи примыкающему смежному бетонному покрытию в зависимости от расчетной ситуации приведены в таблице 1.

Заключение

В соответствии с результатами моделирования прогрева стальных конструкций, представленными в таблице 1, следует отметить, что при определении огнестойкости с учетом теплопередачи смежным примыкающим конструкциям оптимальная толщина огнезащитного вспучивающегося покрытия для обеспечения требуемого предела огнестойкости значительно меньше (в 1,2 раза при температурном воздействии в течение 30 мин, 1,7–3,1 при температурном воздействии в течение 45 мин и 2,3–4,4 при температурном воздействии в течение 60 мин в зависимости от вида рассматриваемой конструкции и расчетной ситуации).

¹⁴ См. сноску 2.

¹⁵ Межгосударственный стандарт. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Взамен СТ СЭВ 1000-78; введ. 01.10.1998. – Минск: Минстройархитектуры, 1998. – 16 с.

¹⁶ См. сноску 2.

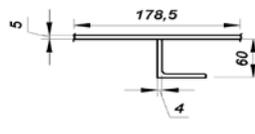
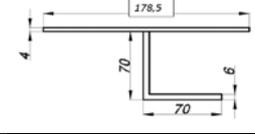
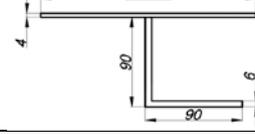
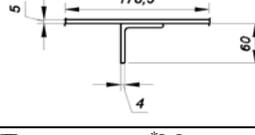
¹⁷ См. сноску 3.

¹⁸ См. сноску 3.

¹⁹ Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1992-1-2 (02250); введ. 10.12.2009. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 86 с.

²⁰ См. сноску 2.

Таблица 1. – Результаты моделирования 4 видов составного перекрытия при температурном воздействии

| Вид перекрытия | Критическая температура, °С | Время температурного воздействия, мин | Расчетная ситуация 3.1 | Расчетная ситуация 3.2 | Расчетная ситуация 3.3 | Расчетная ситуация 3.4 |
|--|-----------------------------|---------------------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | толщина огнезащиты, мм / температура, °С | | | |
|  | 708 | 30 | 0,358 / 617 | 0,358 / 534 | 0,358 / 410 | 0,358 / 408 |
| | | 45 | 0,600 / 704 | 0,358 / 692 | 0,358 / 540 | 0,358 / 534 |
| | | 60 | 1,300 / 689 | 0,800 / 668 | 0,358 / 671 | 0,358 / 659 |
|  | 690 | 30 | 0,358 / 619 | 0,358 / 548 | 0,358 / 434 | 0,358 / 433 |
| | | 45 | 0,700 / 689 | 0,400 / 681 | 0,358 / 578 | 0,358 / 573 |
| | | 60 | 1,350 / 684 | 0,800 / 687 | 0,450 / 670 | 0,420 / 667 |
|  | 654 | 30 | 0,358 / 581 | 0,358 / 563 | 0,358 / 464 | 0,358 / 463 |
| | | 45 | 0,009 / 651 | 0,550 / 645 | 0,358 / 607 | 0,358 / 603 |
| | | 60 | 1,400 / 684 | 1,100 / 654 | 0,600 / 652 | 0,600 / 644 |
|  | 540 | 30 | 0,450 / 517 | 0,358 / 457 | 0,358 / 342 | 0,358 / 329 |
| | | 45 | 1,100 / 538 | 0,550 / 528 | 0,358 / 463 | 0,358 / 414 |
| | | 60 | 1,586 / 567* | 1,100 / 515 | 0,400 / 516 | 0,358 / 527 |

Примечание. *Максимальная толщина не позволяет обеспечить требуемую расчетную температуру сечения.

Результаты моделирования свидетельствуют, что учет теплообмена стального сечения с бетонным покрытием позволяет существенно снизить расчетную температуру стального сечения и уменьшить оптимальную толщину огнезащиты. Причем с увеличением времени температурного воздействия увеличивается интенсивность теплопередачи в бетонное покрытие. Вследствие этого разница оптимального слоя огнезащитного покрытия, необходимого для обеспечения требуемого предела огнестойкости, при моделировании прогрева с учетом теплопередачи смежному бетонному покрытию возрастает по отношению к оптимальной толщине огнезащитного покрытия при моделировании прогрева без учета теплопередачи смежному бетонному покрытию. Оптимальная толщина огнезащитного покрытия, обеспечивающая требуемый предел огнестойкости, снижается в 1,2...4,4 раза в зависимости от требуемого предела огнестойкости и вида рассматриваемых конструкций (перекрытия) и расчетной ситуации. Таким образом, использование расчетных моделей в системе конечно-элементного анализа ANSYS позволяет учесть суммарный огнезащитный эффект и найти оптимальную толщину огнезащитного покрытия, существенно меньшую по сравнению с консервативными методами расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пехотиков, А.В. Огнестойкости изгибаемых стальных конструкций: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / А.В. Пехотиков. – М., 2008. – 198 с.
2. Жамойдик, С.М. Огнестойкость стальных колонн с конструктивной огнезащитой: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / С.М. Жамойдик. – Минск, 2017. – 129 с.
3. Ботян, С.С. Оценка нагрева стальных несущих элементов здания с учетом примыкающих конструкций / С.С. Ботян [и др.] // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве: сб. материалов VII Международной заочной научно-практической конференции, Минск, 23 декабря 2020 г. / Университет гражданской защиты МЧС Беларуси. – Минск, 2021. – С. 15.
4. Гравит, М.В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий / М.В. Гравит // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 5. – С. 33–37.

Оценка огнестойкости стальных строительных конструкций с учетом влияния теплообмена с примыкающими смежными конструкциями
Evaluation of fire resistance of steel building structures taking into account the influence of heat exchange with adjacent structures

Ботян Сергей Сергеевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

Sergey S. Botyan

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Safety, Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

e-mail: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

Жамойдик Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0407-5176

Sergey M. Zhamoydik

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Safety, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0407-5176

Кудряшов Вадим Александрович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», отдел научной и инновационной деятельности, начальник отдела

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: vadkud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

Vadim A. Kudryashov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Department of Scientific and Innovation Activity, Head of the Department

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

e-mail: vadkud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

Олесиук Николай Михайлович

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», сектор международного сотрудничества, начальник сектора

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: nikolai-96@tut.by

ORCID: 0000-0001-5925-1371

Nikolai M. Olesiyuk

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», International Cooperation Sector, Head of Sector

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

e-mail: nikolai-96@tut.by

ORCID: 0000-0001-5925-1371

Писченков Иван Александрович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет
предупреждения и ликвидации
чрезвычайных ситуаций, курсант

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: ipischenkov@mail.ru

Ivan A. Pischenkov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Prevention and Elimination of Emergency
Situations Faculty, cadet

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: ipischenkov@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.278>

EVALUATION OF FIRE RESISTANCE OF STEEL BUILDING STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF HEAT EXCHANGE WITH ADJACENT STRUCTURES

Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Olesiyuk N.M., Pischenkov I.A.

Purpose. On the basis of experimental studies and theoretical data, to determine the thermophysical characteristics of an intumescent fire retardant and evaluate the heating of steel structures with intumescent fire protection of the outer surface, taking into account the adjoining of a concrete coating, as well evaluate the effect of heat transfer with a concrete coating on the optimal layer thickness of an intumescent fire retardant to ensure the required fire resistance limit.

Methods. Modeling in the system of finite element analysis.

Findings. On the basis of a series of experimental and theoretical studies in the ANSYS finite element analysis system, the thermotechnical problem of fire resistance of steel structures with fire protection of the outer surface based on an intumescent composition was solved, taking into account the abutment of a concrete coating. Experimental studies are used to assess the effective values of the thermophysical characteristics of an intumescent composition by solving the inverse problem of thermal conductivity for a computational finite element model using parametric optimization methods. The obtained thermophysical characteristics made it possible to evaluate the heating of steel structures with fire protection, taking into account heat transfer with a concrete coating. Depending on the required fire resistance level and the type of the considered structures (floor slab) and the design situation, taking into account heat exchange with the concrete coating, the optimal thickness of the fire retardant coating that provides the required fire resistance level is reduced by 1.2 ... 4.4 times.

Application field of research. The results can be used to solve the fire resistance problems of steel structures with partial and full fire protection of the outer surface during the design and construction of buildings and structures.

Keywords: fire resistance, intumescent fire protection, effective thermophysical characteristics, inverse problem of thermal conductivity, standard temperature conditions, steel structures, finite element method.

(The date of submitting: July 13, 2021)

1. Pekhotikov A.V. *Ognestoykosti izgibaemykh stal'nykh konstruksiy* [Fire resistance of bent steel structures]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Moscow, 2008. 198 p. (rus)
2. Zhamoidik, S.M. *Ognestoykost' stal'nykh kolonn s konstruktivnoy ognezashchitoy* [Fire resistance of steel columns with constructive fire protection]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Minsk, 2017. 129 p. (rus)
3. Batyan S.S., Kudryashov V.A., Zhamoidik S.M., Kreer L.A., Olesiyuk N.M., Pischenkov I.A. Otsenka nagreva stal'nykh nesushchikh elementov zdaniya s uchetom primykayushchikh konstruksiy [Assessment of heating of steel bearing elements of a building taking into account adjoining structures] *Proc. VII Intern. corresp. scientific-practical conf. «Problemy obespecheniya bezopasnosti lyudey pri pozhare i vzryve»*, Minsk, December 23, 2020. University of Civil Protection of the MES of the Republic of Belarus. Minsk: UCP, 2021. P. 15. (rus)
4. Gravit M.V. Otsenka porovogo prostranstva penokoksa ognezashchitnykh vspuchivayushchikhsya pokrytiy [Evaluation of the pore space of the foam coke flame retardant intumescent coatings] *Fire and Explosion Safety*, 2013. No 5. Pp. 33–37. (rus)