

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООБМЕНА С ПРИМЫКАЮЩИМИ СМЕЖНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Ботян С.С., Жамойдик С.М., Олеснюк Н.М.

*Цель.* Провести анализ методов оценки несущей способности стальных конструкций с учетом теплообмена с примыкающими смежными строительными элементами.

*Методы.* Моделирование в системе конечно-элементного анализа, теоретический анализ.

*Результаты.* В системе конечно-элементного анализа ANSYS решена теплотехническая задача огнестойкости стальных огнезащищенных конструкций с учетом примыкания бетонного покрытия. Проведен анализ методов оценки несущей способности стальных конструкций с учетом теплообмена с примыкающими смежными строительными элементами. Определены преимущества и недостатки рассмотренных методов: методы могут учитывать примыкание смежных строительных конструкций как идеальную теплоизоляцию со стороны примыкания; путем применения повышающих коэффициентов огнестойкости в случаях, когда температура стального сечения или его элементарных площадок превышает 400 °С.

Некоторые из рассмотренных методов учитывают теплообмен с примыкающими смежными элементами путем введения коэффициентов для примыкающих элементов из бетона или композитных плит. При этом стальные конструкции могут примыкать также к элементам из других материалов. Принимаемая температура для определения коэффициента снижения предела текучести согласно проанализированным источникам приводит к получению отличающихся значений несущей способности, что свидетельствует о необходимости проведения экспериментальных исследований для уточнения оптимальных значений принимаемой температуры.

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

*Ключевые слова:* огнестойкость, смежные элементы, несущая способность, стандартный температурный режим, стальные конструкции, метод конечных элементов.

(Поступила в редакцию 21 февраля 2023 г.)

### Введение

В современном мире строительство развивается высокими темпами. Технологии позволяют возводить здания различных типов с использованием доступных строительных материалов и элементов. Одними из наиболее распространенных строительных конструкций являются стальные.

Для применяемых конструкций в целях обеспечения их безопасности предъявляется ряд требований. Одним из рассматриваемых показателей, нормируемых для строительных конструкций, является огнестойкость. Основные задачи огнестойкости: обеспечение эвакуации и спасение людей, обеспечение для прибывших подразделений безопасных условий для ликвидации пожара. Прогрев конструкций приводит к снижению прочностных и деформационных характеристик, из-за чего конструкция может достичь предельного состояния, а это может повлечь гибель людей, а также значительный материальный ущерб [1]. Поэтому обеспечение требуемой огнестойкости указанных конструкций является важной и актуальной задачей.

Под огнестойкостью в данной статье подразумевается способность конструктивной системы, ее части или отдельной конструкции выполнять требуемые функции (несущую и (или) ограждающую) в течение установленной продолжительности регламентируемого

пожара при заданном уровне нагрузки<sup>1</sup>. Один из критериев огнестойкости конструкций – наступление предельного состояния по несущей способности. Несущая способность при пожаре определяется потерей прочности или устойчивости конструкции [2].

Настоящая статья посвящена огнестойкости стальных конструкций. При воздействии пожара на стальную конструкцию со всех сторон при упрощенном методе расчета принимается, что конструкция прогревается равномерно, и температура в расчетном сечении имеет одинаковое значение. Однако нередко встречаются конструкции, которые могут примыкать к смежным строительным элементам (железобетонным плитам, сэндвич-панелям и др.). Ввиду примыкания элементов друг к другу происходит уменьшение обогреваемого периметра. Ввиду осуществления теплообмена со смежными примыкающими элементами прогрев стальных конструкций будет происходить неравномерно по стальному сечению. Вследствие теплообмена со смежными элементами происходит снижение температуры стального сечения и увеличение несущей способности. В настоящее время в расчетных моделях неравномерный прогрев стального сечения учитывается косвенно, а для ряда конструкций не учитывается вовсе. Учет теплообмена с примыкающими смежными элементами может снизить расчетную температуру стального сечения и, как следствие, уменьшить необходимую толщину огнезащитных средств и материалов. Поэтому разработка методов оценки огнестойкости стальных строительных конструкций с учетом влияния теплообмена с примыкающими смежными конструкциями является важной и актуальной задачей.

### Основная часть

В настоящее время широко используется ряд методов оценки несущей способности стальных строительных конструкций. В общем случае указанные методы применяются для конструкций, подвергающихся равномерному прогреву.

Существует ряд методов оценки несущей способности конструкций, которые косвенно учитывают неравномерность прогрева стального сечения. При оценке несущей способности конструкций при неравномерном прогреве стального сечения существует несколько вариантов принимаемой для расчетов температуры стального сечения:

- средняя температура стального сечения (сталь принимается как материал с высокой теплопроводностью)<sup>2</sup>;
- максимальная температура в сжатой полке<sup>3</sup>;
- средняя температура в наиболее напряженной полке<sup>4</sup>.

Указанные варианты принимаемой для расчетов температуры стального сечения дают разные значения огнестойкости стальных конструкций при одинаковом температурном и геометрическом воздействии пожара и величине нагрузки, а в ряде случаев не дают возможности оценить огнестойкость стальных конструкций расчетным методом.

Классически расчетная оценка несущей способности стальных конструкций осуществляется с использованием упрощенных методов расчета, основанных на расчете теплоемкости системы без учета теплопотерь в смежные конструкции [3; 4]; при этом в ряде

<sup>1</sup> Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: СН 2.01.03-2019. – Введ. 08.09.20. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 43 с.

<sup>2</sup> 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. – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2012. – 40 с.

<sup>3</sup> Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1993-1-2-2009 (02250). – Введ. 01.01.10. – Минск: Минстройархитектуры, 2010. – 77 с.

<sup>4</sup> Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с композицией огнезащитной, выполненной из плит теплоизоляционных из минеральной (каменной) ваты CONLIT SL 150 ТУ 5762-050-45757203-15 и клея CONLIT Glue ТУ 2252-018-52935415-2010: утв. зам. нач. ФГБУ ВНИИПО МЧС России 19.01.2011. – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2011. – 32 с.

нормативных документов допускается использовать более подробные, так называемые общие методы расчета<sup>5</sup>. Общие методы расчета подразумевают наличие данных о распределении температур в стальном сечении. В силу сложности математического аппарата общего метода расчета в случае необходимости решения дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов данная задача может быть выполнена с использованием программных комплексов, например ANSYS [5].

Упрощенные методы в настоящее время широко используются при расчете огнестойкости стальных конструкций, которые могут быть подвержены при пожаре температурному воздействию со всех сторон и для которых нет необходимости получать распределение температур в пределах стального сечения, дают достаточно хорошее совпадение с результатами экспериментальных исследований прогрева этих конструкций [3].

Однако существуют конструкции, которые могут примыкать к смежным строительным элементам и, соответственно, при температурном воздействии на которые распределение температур в стальном сечении будет неравномерным ввиду ограничения периметра температурного воздействия, а также теплообмена с примыкающими смежными элементами. В таких случаях целесообразно использование общего метода расчета.

Оценка несущей способности таких конструкций осуществляется на основании ряда методов. В настоящей работе проанализированы методы оценки несущей способности стальных строительных конструкций, приведенные в п. 4.2.3 ТКП EN 1993-1-2-2009 (02250)<sup>6</sup> (далее – Еврокод 3).

Метод 1 – оценка несущей способности при равномерном распределении температуры – применяется для стальных конструкций 1, 2 и 3-го класса сечений<sup>7</sup> с использованием формулы:

$$M_{pl,Rd,fi} = \chi_{LT,fi} W_f k_y / \gamma_{M,fi}, \quad (1)$$

где  $\chi_{LT,fi}$  – понижающий коэффициент для учета местной потери устойчивости вследствие кручения с изгибом при расчетном пожаре;

$W_{pl}$  – момент сопротивления, м<sup>3</sup>;

$f_y$  – предел текучести стали, МПа;

$k_y$  – коэффициент снижения предела текучести стали при температуре конструкции  $\theta$ ;

$\gamma_{M,fi}$  – частный коэффициент безопасности для соответствующей характеристики материала при пожаре.

Метод 2 – оценка несущей способности при неравномерном распределении температуры – применяется для стальных конструкций с сечениями 1-го и 2-го класса, учитывает неравномерность прогрева стального сечения, но не учитывает потерю устойчивости, подразумевает разбиение стального сечения на элементарные площадки (для рассматриваемых конструкций принято согласно рисунку 1) и применяется для стальных конструкций 1-го и 2-го класса сечений с использованием формулы:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} f_{y,i} / \gamma_{M,fi}, \quad (2)$$

где  $A_i$  – площадь  $i$ -й элементарной площадки;

$z_i$  – расстояние от нейтральной оси сечения до центра тяжести  $i$ -й элементарной площадки при пластических деформациях;

<sup>5</sup> См. сноску 3.

<sup>6</sup> См. сноску 3.

<sup>7</sup> Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1993-1-1-2009 (02250). – Введ. 01.01.10. – Минск: Минстройархитектуры, 2010. – 85 с.

$k_{y,\theta,i}$  – коэффициент снижения предела текучести стали  $i$ -й элементарной площадки при средней температуре  $\theta_a$ , достигаемой в момент времени  $t$  (определяется методом линейной интерполяции);

$f_{y,i}$  – предел текучести стали  $i$ -й элементарной площадки, МПа.

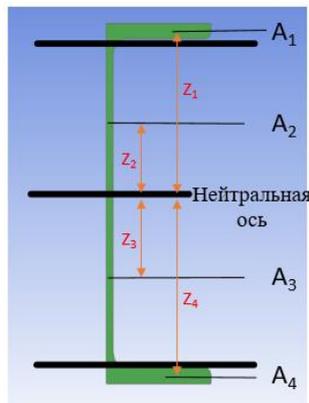


Рисунок 1. – Разбиение стального сечения на элементарные площадки

Метод 3 – оценка несущей способности при неравномерном распределении температуры – позволяет учесть теплообмен с элементами из бетона или композитного материала (материала, изготовленного из двух и более материалов с существенно различными физическими и химическими свойствами) путем введения коэффициентов, учитывающих неравномерность распределения температуры как по длине, так и по ширине конструкции:

$$M_{f_{i,t},Rd} = \frac{M_{f_{i,\theta,Rd}}}{k_1 k_2} = \frac{\chi_{LT,f} W_f k_y}{\gamma_{m_0 f} k_1 k_2}, \quad (3)$$

где  $M_{f_{i,\theta,Rd}}$  – расчетное сопротивление поперечного сечения изгибающему моменту при равномерном распределении температуры  $\theta_a$ , равной равномерно распределенной температуре в момент времени  $t$  в поперечном сечении, не подвергающемся тепловому воздействию в месте расположения опор;

$k_1$  – поправочный коэффициент для учета неравномерного распределения температуры по ширине поперечного сечения<sup>8</sup>;

$k_2$  – поправочный коэффициент для учета неравномерного распределения температуры по длине конструкции<sup>9</sup>.

В целях определения применимости указанных методов с точки зрения обеспечения несущей способности стальных строительных конструкций при минимальной толщине огнезащитных средств проведен анализ указанных методов на примере швеллеров 18У (класс сечения 1), 20У (класс сечения 1) и 22У (класс сечения 1)<sup>10</sup>, примыкающих к бетонному покрытию толщиной 100 и 200 мм, внутренняя полость конструкций заполнена каменной ватой, а по свободному периметру конструкции защищены слоем цементно-песчаной штукатурки толщиной 30 мм (рис. 2). Анализ проводился с использованием различных расчетных сценариев – как с идеальной теплоизоляцией со стороны примыкания к смежным элементам, так и с учетом теплообмена с примыкающими смежными элементами. Рассматриваемое время стандартного температурного воздействия на указанные конструкции – 45, 60 и 90 мин.

<sup>8</sup> См. сноску 3.

<sup>9</sup> См. сноску 3.

<sup>10</sup> Межгосударственный стандарт. Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент: ГОСТ 8240-97. – Введ. 01.01.02. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 6 с.

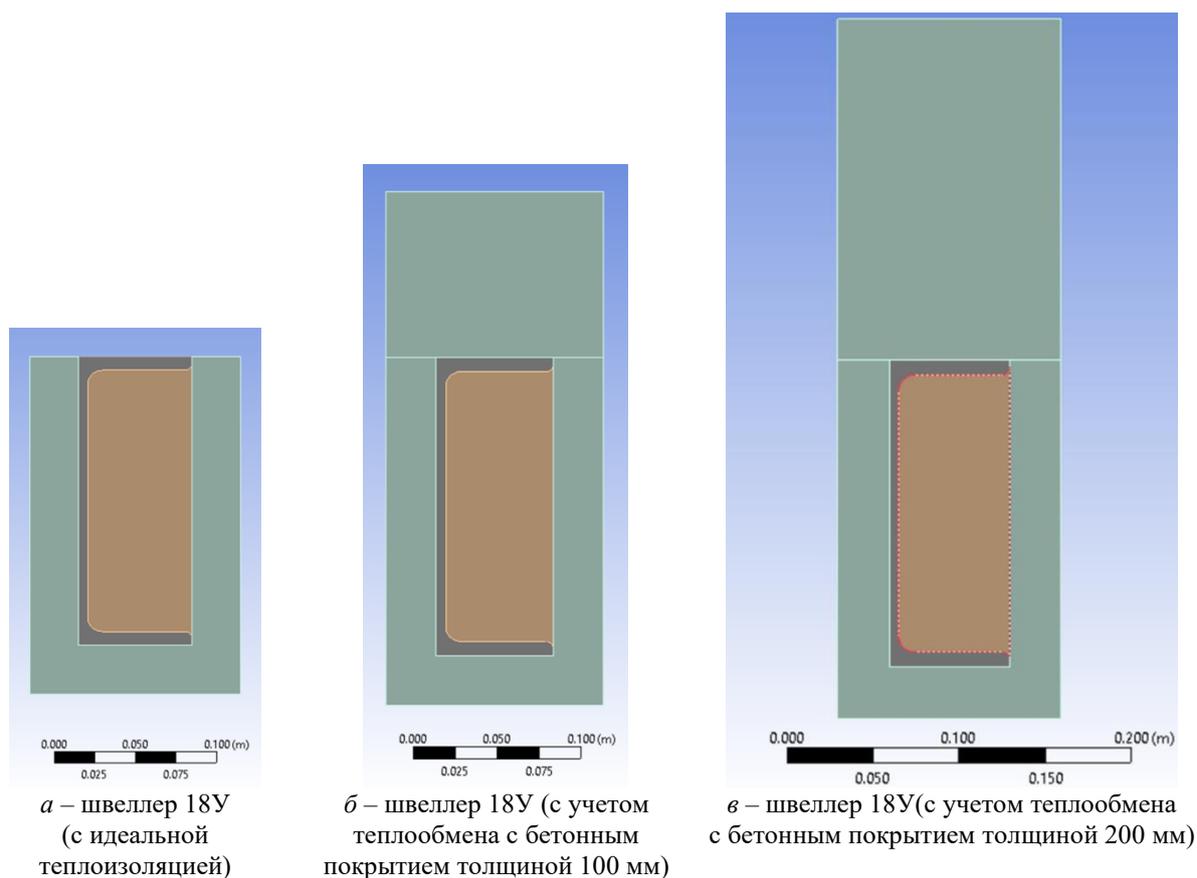


Рисунок 2. – Модели рассматриваемых конструкций на примере швеллера 18У

Распределение температуры стального сечения получено при моделировании прогрева в программном комплексе ANSYS. При разработке моделей (в данной статье под моделью следует понимать расчетную ситуацию) 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):

– температура греющей среды принята равной изменению стандартного температурного режима<sup>11</sup>;

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

– степень черноты поверхности материалов принята равной: 0,87 [7] для цементно-песчаной штукатурки, 0,7 для бетона<sup>12</sup> и 1,0 для пламени<sup>13</sup> (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.

Теплофизические характеристики материалов приняты для стали согласно Еврокоду 3, для бетона согласно ТКП EN 1992-1-2 (02250) (далее – Еврокод 2), для цементно-

<sup>11</sup> Межгосударственный стандарт. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Введ. 01.10.98. – Взамен СТ СЭВ 1000-78. – Минск: Минстройархитектуры, 1998. – 16 с.

<sup>12</sup> Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1992-1-2-2009 (02250). – Введ. 01.01.10. – Минск: Минстройархитектуры, 2010. – 86 с.

<sup>13</sup> См. сноску 3.

песчаной штукатурки и каменной ваты плотностью 135 кг/м<sup>3</sup> [8] представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

**Таблица 1. – Характеристики цементно-песчаной штукатурки**

Наименование материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м×К)	Коэффициент теплоемкости, Дж/(кг×К)
Цементно-песчаная штукатурка	1930	0,96-0,00044×t	598+0,63×t

**Таблица 2. – Характеристики каменной ваты Фасад 12 Белтеп**

Наименование материала	Температура, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м×К)	Коэффициент теплоемкости, Дж/(кг×К)
Каменная вата	20	135,000	0,0360	880
	100	135,000	0,0470	1040
	200	132,300	0,8876	1160
	400	131,895	0,1723	1280
	600	131,355	0,2873	1355
	800	130,950	0,4406	1430
	925	129,600	0,5747	1477
	1200	119,745	0,8626	1580

Для анализа вышеописанных методов разработано 6 расчетных моделей:

Модель 1 реализуется применением метода 1 Еврокода 3, со стороны примыкания смежного элемента принята идеальная теплоизоляция. Для расчета принимались следующие температуры стального сечения:

- средняя температура сечения;
- максимальная температура сжатой полки;
- средняя температура наиболее напряженной полки (для рассматриваемых конструкций в качестве наиболее напряженной полки принята нижняя полка, т.к. ее температура выше и, соответственно, несущая способность полки как элемента ниже).

Модель 2 также реализуется применением метода 1, однако со стороны примыкания к бетонному покрытию учтен теплообмен стального сечения с бетонным покрытием. Для расчета принимались следующие температуры стального сечения:

- средняя температура сечения;
- максимальная температура сжатой полки;
- средняя температура наиболее напряженной полки (для рассматриваемых конструкций в качестве наиболее напряженной полки принята нижняя полка, т.к. ее температура выше и, соответственно, несущая способность полки как элемента ниже).

Модель 3 реализуется применением метода 2 Еврокода 3, со стороны примыкания смежного элемента принята идеальная теплоизоляция. Разбиение на элементарные площадки осуществлено согласно рисунку 1. Для расчета принята средняя температура элементарной площадки.

Модель 4 реализуется применением метода 2 Еврокода 3, со стороны примыкания смежного элемента учтен теплообмен с примыкающим смежным бетонным покрытием. Разбиение на элементарные площадки осуществлено согласно рисунку 1. Для расчета принята средняя температура элементарной площадки.

Модель 5 учитывает теплообмен с примыкающим элементом путем введения коэффициента  $k_1$ <sup>14</sup>. При расчете использованы данные несущей способности, полученные в модели 1.

<sup>14</sup> См. сноску 3.

Модель 6 учитывает теплообмен с примыкающим элементом путем введения коэффициента  $k_1$ <sup>15</sup>. При расчете использованы данные несущей способности, полученные в модели 3.

Результаты оценки несущей способности приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты оценки несущей способности рассматриваемых конструкций согласно методам Еврокода 3 ( $\chi_{LT,fi} = 1$ ;  $k_1 = 0,85$ )

Номер и серия швеллера <sup>16</sup>	Время температурного воздействия, мин	Расчетное сопротивление изгибающему моменту, $M_{fi,t,Rd}$ , кН/м					
		Коэффициент снижения предела текучести принят по температурным значениям согласно средней температуре / максимальной температуре в сжатой полке / средней температуре полки					
		Метод 1		Метод 2		Метод 3	
		Модель 1 (с идеальной теплоизоляцией со стороны периметра примыкания)	Модель 2 (с учетом теплообмена с бетонной плитой)	Модель 3 (с идеальной теплоизоляцией со стороны периметра примыкания)	Модель 4 (с учетом теплообмена с бетонной плитой)	Модель 5 (теплообмен учтен посредством расчета как с идеальной теплоизоляцией модели 1 введением коэффициента)	Модель 6 (теплообмен учтен посредством расчета как с идеальной теплоизоляцией модели 3 введением коэффициента)
		Толщина бетонной плиты перекрытия 100 мм					
18У	45	34,2 / 34,2 / 31,6	34,2 / 34,2 / 32,0	32,7 / – / –	33,0 / – / –	40,2 / 40,2 / 37,1	38,5 / – / –
	60	27,0 / 30,0 / 22,5	32,2 / 34,2 / 23,6	26,3 / – / –	29,0 / – / –	31,7 / 35,3 / 26,5	30,9 / – / –
	90	11,8 / 14,8 / 8,6	20,3 / 30,7 / 10,1	11,8 / – / –	20,5 / – / –	13,9 / 17,4 / 10,1	13,8 / – / –
20У	45	43,0 / 43,0 / 39,9	43,0 / 43,0 / 40,2	41,2 / – / –	41,4 / – / –	50,6 / 50,6 / 46,9	48,5 / – / –
	60	34,7 / 38,6 / 28,6	41,2 / 43,0 / 29,3	33,6 / – / –	36,2 / – / –	40,8 / 45,4 / 33,7	39,5 / – / –
	90	15,9 / 19,8 / 11,2	26,9 / 39,6 / 12,3	15,7 / – / –	25,9 / – / –	18,7 / 23,3 / 13,2	18,5 / – / –
22У	45	53,9 / 53,9 / 50,8	53,9 / 53,9 / 51,1	52,3 / – / –	52,5 / – / –	63,4 / 63,4 / 59,8	61,5 / – / –
	60	43,3 / 50,0 / 37,0	51,5 / 53,9 / 37,7	43,6 / – / –	46,1 / – / –	51,0 / 58,8 / 43,6	51,3 / – / –
	90	20,8 / 27,3 / 14,9	33,4 / 51,3 / 15,9	21,3 / – / –	33,2 / – / –	24,5 / 32,2 / 17,5	25,0 / – / –
		Толщина бетонной плиты перекрытия 200 мм					
18У	45	34,2 / 34,2 / 31,6	34,2 / 34,2 / 32,0	32,7 / – / –	33,0 / – / –	40,2 / 40,2 / 37,1	38,5 / – / –
	60	27,0 / 30,0 / 22,5	34,2 / 34,2 / 23,6	26,3 / – / –	29,0 / – / –	31,7 / 35,3 / 26,5	30,9 / – / –
	90	11,8 / 14,8 / 8,6	20,4 / 30,7 / 10,1	11,8 / – / –	20,7 / – / –	13,9 / 17,4 / 10,1	13,8 / – / –
20У	45	43,0 / 43,0 / 39,9	43,0 / 43,0 / 40,2	41,2 / – / –	41,4 / – / –	50,6 / 50,6 / 46,9	48,5 / – / –
	60	34,7 / 38,6 / 28,6	43,0 / 43,0 / 29,4	33,6 / – / –	36,3 / – / –	40,8 / 45,4 / 33,7	39,5 / – / –
	90	15,9 / 19,8 / 11,2	26,9 / 39,7 / 12,3	15,7 / – / –	25,9 / – / –	18,7 / 23,3 / 13,2	18,5 / – / –
22У	45	53,9 / 53,9 / 50,8	53,9 / 53,9 / 51,1	52,3 / – / –	52,5 / – / –	63,4 / 63,4 / 59,8	61,5 / – / –
	60	43,3 / 50,0 / 37,0	53,9 / 53,9 / 37,7	43,6 / – / –	46,1 / – / –	51,0 / 58,8 / 43,6	51,3 / – / –
	90	20,8 / 27,3 / 14,9	33,5 / 51,4 / 15,9	21,3 / – / –	33,4 / – / –	24,5 / 32,2 / 17,5	25,0 / – / –

Как видно из таблицы 3, для рассматриваемых конструкций и рассматриваемого времени температурного воздействия разница значений несущей способности при примыкании бетонного покрытия толщиной 100 и 200 мм составляет не более 1 %, что свидетельствует о незначительном влиянии увеличения толщины бетонного покрытия с 100 до 200 мм для рассматриваемых конструкций при заданных параметрах моделирования прогрева.

<sup>15</sup> См. сноску 3.

<sup>16</sup> См. сноску 10.

При температурном воздействии 45 мин разница в значениях несущей способности модели 1 и модели 2 практически отсутствует. Это связано с тем, что для указанного времени температурного воздействия температура стального сечения не будет превышать 400 °С, соответственно, применяется коэффициент снижения предела текучести, равный 1. При этом стоит подчеркнуть, что применение метода 3 в моделях 5 и 6 с учетом значения коэффициента снижения предела текучести, равного 1, приводит к отличающимся значениям несущей способности на 17–18 %.

Для определения и уточнения рассмотренных методов проведен ряд экспериментальных исследований.

Стоит отметить, что в строительстве могут применяться конструкции, несущую способность которых как цельной конструктивной системы нецелесообразно оценивать по методам Еврокода 3 (рис. 3).

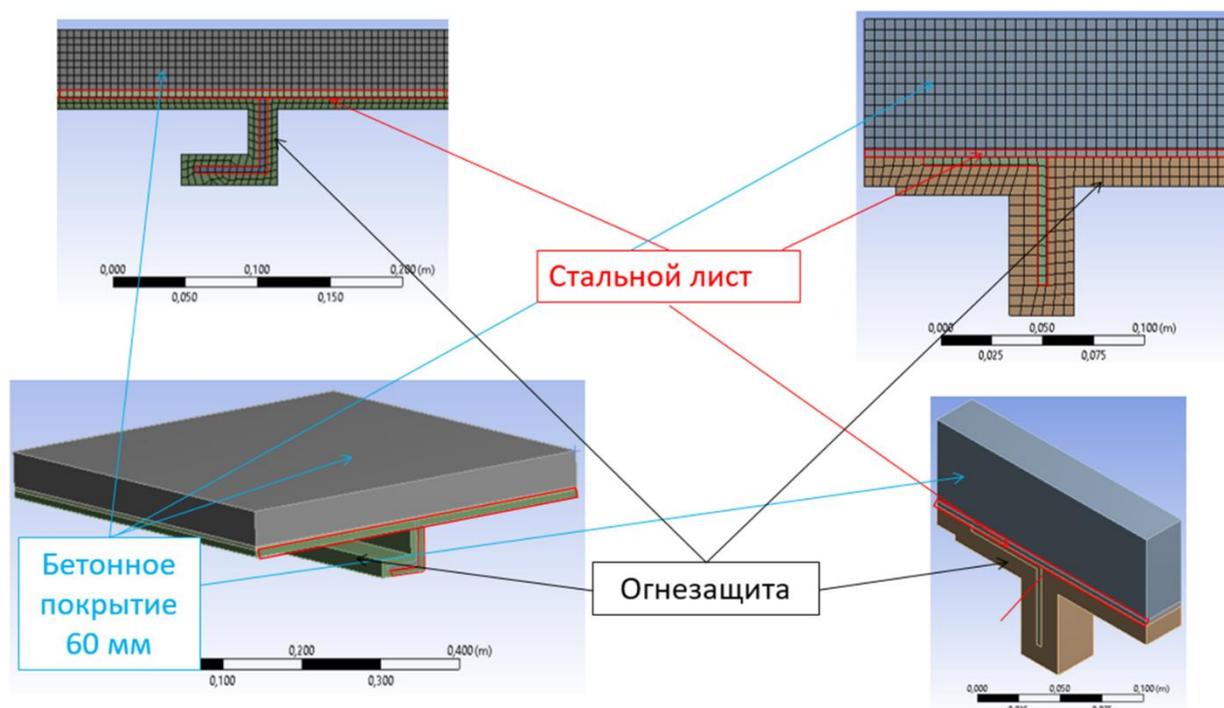


Рисунок 3. – Пример нестандартной конструкции

Конструкция представляет собой стальной лист, усиленный уголком 70×70×6 мм. Стальной лист примыкает к бетонному покрытию толщиной 60 мм.

Для указанной конструкции на основании разработанных моделей рассмотрены 3 расчетные модели:

- модель 1 с использованием метода 1, при этом со стороны примыкания бетонного покрытия принята идеальная теплоизоляция;
- модель 2 с использованием метода 1, при этом со стороны примыкания бетонного покрытия учтен теплообмен стального сечения с бетонным покрытием;
- модель 5 – теплообмен учтен посредством расчета как с идеальной теплоизоляцией модели 1 введением коэффициента.

Результаты оценки несущей способности приведены в таблице 4 по аналогии с таблицей 2 для удобства анализа.

Проанализировав данные, указанные в таблице 4, отметим, что полученные значения несущей способности при идеальной теплоизоляции со стороны примыкания и при теплообмене с примыкающим элементом отличаются более чем в 3,5 раз, что также свидетельствует о необходимости проведения дальнейших исследований рассмотренных

методов с целью оптимальной оценки несущей способности, а также проведения экспериментальных исследований.

**Таблица 4. – Результаты оценки несущей способности нестандартной конструкции согласно методам Еврокода 3**

Сортамент конструкции	Время температурного воздействия, мин	Расчетное сопротивление изгибающему моменту, кН/м					
		Коэффициент снижения предела текучести принят по температурным значениям согласно средней температуре					
		Метод 1		Метод 2		Метод 3	
		Модель 1 (с идеальной теплоизоляцией со стороны периметра примыкания)	Модель 2 (с учетом теплообмена с бетонной плитой)	Модель 3 (с идеальной теплоизоляцией со стороны периметра примыкания)	Модель 4 (с учетом теплообмена с бетонной плитой)	Модель 5 (теплообмен учтен посредством расчета как с идеальной теплоизоляцией модели 1 введением коэффициента)	Модель 6 (теплообмен учтен посредством расчета как с идеальной теплоизоляцией модели 3 введением коэффициента)
		Толщина бетонной плиты перекрытия 60 мм					
Составная конструкция	60	1,60	5,23	–	–	1,88	–

### Заключение

В системе конечно-элементного анализа ANSYS решена теплотехническая задача огнестойкости стальных огнезащищенных конструкций с учетом примыкания бетонного покрытия на примере ряда конструкций. Проведен анализ представленных в п. 4.2.3 Еврокода 3<sup>17</sup> методов оценки несущей способности стальных конструкций с учетом теплообмена с примыкающими смежными строительными элементами. Определены преимущества и недостатки рассмотренных методов. В соответствии с результатами моделирования прогрева стальных конструкций, а также оценки несущей способности рассматриваемых конструкций отметим следующее.

1. Метод 1 может учитывать примыкание смежных строительных конструкций как идеальную теплоизоляцию со стороны примыкания.

2. Результаты, полученные при применении метода 2, будут соответствовать результатам, полученным при применении метода 1.

3. Теплообмен с примыкающими смежными элементами в методе 1 и методе 2 может быть учтен при применении метода 3. Однако стоит отметить, что применение метода 3 в случаях, когда температура стального сечения или его элементарных площадок не превышает 400 °С, применение коэффициентов, учитывающих примыкание смежных элементов, является нецелесообразным, т.к. в указанном случае значение коэффициента снижения предела текучести равно 1.

4. Метод 3 учитывает теплообмен только с композитными плитами и бетонными примыкающими смежными элементами путем введения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ , учитывающих неравномерность распределения температур по стальному сечению и по длине балки соответственно. При этом стальные конструкции могут примыкать также к элементам из других материалов (пример – сталебетон).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Худина, К.И. Оценка предела огнестойкости несущих конструкций в условиях внутреннего пожара / К.И. Худина // Инновационная наука. – 2021. – № 4. – С. 76–79. – EDN: NVDXJS.
2. Жамойдик, С.М. Табличные данные для оценки огнестойкости изгибаемых стальных балок без огнезащиты / С.М. Жамойдик, К.В. Шкараденко, С.Ф. Лященко // Вестник Университета

<sup>17</sup> См. сноску 3.

- гражданской защиты МЧС Беларуси – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 58–73. – DOI: 10.33408/2519-237X. 2022.6-1.58. – EDN: SJFSSC.
3. Жамойдик, С.М. Огнестойкость стальных колонн с конструктивной огнезащитой: дис. канд. техн. наук: 05.26.03 / С.М. Жамойдик. – Минск, 2017. – 129 л.
  4. 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 Междунар. заочной науч.-практ. конф., Минск, 23 дек. 2020 г. – Минск: УГЗ, 2021. – С. 15.
  5. Голованов, В.И. Оценка огнестойкости стальных конструкций при нормируемых температурных режимах пожара / В.И. Голованов, Г.И. Крючков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 3. – С. 52–60. – DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60. – EDN: HGFYQF.
  6. Гравит, М.В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий / М.В. Гравит // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 5. – С. 33–37. – EDN: QIYYTX.
  7. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
  8. Schleifer, V. Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall: dissertation ETH Nr. 18156 / V. Schleifer. – Zürich, 2009. – 147 s. (deu). – DOI: 10.3929/ethz-a-005771863.

**Анализ методов оценки огнестойкости стальных строительных конструкций с учетом влияния теплообмена с примыкающими смежными конструкциями**

**Analysis of evaluation methods of fire resistance of steel building structures, taking into account the effect of heat transfer with adjacent structures**

**Ботян Сергей Сергеевич**

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси», кафедра пожарной безопасности, начальник кафедры

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

Email: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

**Sergey S. Botyan**

PhD in Technical Sciences

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

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

Email: 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

Email: 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

Email: zhamoidik.kii@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0407-5176

**Олесьюк 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

Email: nikolai-96@tut.by

ORCID: 0000-0001-5925-1371

**Nikolay 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

Email: nikolai-96@tut.by

ORCID: 0000-0001-5925-1371

## ANALYSIS OF EVALUATION METHODS OF FIRE RESISTANCE OF STEEL BUILDING STRUCTURES, TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF HEAT TRANSFER WITH ADJACENT STRUCTURES

Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Olesiyuk N.M.

*Purpose.* To analyze the methods for assessing the bearing capacity of steel structures, taking into account heat exchange with adjacent building elements.

*Methods.* Modeling in the system of finite element analysis, theoretical analysis.

*Findings.* The ANSYS finite element analysis system has solved the heat engineering task of fire resistance of steel fire-protected structures, taking into account the adjoining concrete coating. The analysis of methods of assessing the bearing capacity of steel structures is carried out, taking into account heat exchange with adjacent building elements. The advantages and disadvantages of the considered methods are determined: the methods can take into account the adjoining of adjacent building structures as an ideal thermal insulation from the adjoining side; by applying increasing fire resistance coefficients in cases where the temperature of the steel section or its elementary areas does not exceed 400 °C.

Some of the considered methods take into account heat exchange with adjoining adjacent elements by introducing coefficients for adjoining elements made of concrete or composite slabs. At the same time, steel structures can also adjoin elements made of other materials. The accepted temperature for determining the coefficient of yield strength reduction according to the analyzed sources leads to different values of the bearing capacity, which indicates the need for experimental studies to clarify the optimal values of the accepted temperature.

*Application field of research.* The results obtained can be used to solve the problems of fire resistance of steel structures with fire protection of the outer surface, taking into account heat exchange with adjacent building structures and elements in the design and construction of buildings and structures.

*Keywords:* fire resistance, adjacent elements, bearing capacity, standard temperature conditions, steel structures, finite element method.

(The date of submitting: February 21, 2023)

### REFERENCES

1. Khudina K.I. Otsenka predela ognestoykosti nesushchikh konstruktsiy v usloviyakh vnutrennego pozhara [Assessment of the fire resistance limit of load-bearing structures in an internal fire]. *Innovatsionnaya nauka*, 2021. No. 4. Pp. 76–79. (rus). EDN: NVDXJS.
2. Zhamoydik S.M., Shkaradenok K.V., Lyashchenko S.F. Tablichnye dannye dlya otsenki ognestoykosti izgibaemykh stal'nykh balok bez ognezashchity [Tabular data for estimating the fire resistance of bendable steel beams without fire protection]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 1. Pp. 58–73. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.58. EDN: SJFSSC.
3. Zhamoydik S.M. *Ognestoykost' stal'nykh kolonn s konstruktivnoy ognezashchitoy* [Fire resistance of steel columns with structural fire protection]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Minsk, 2017. 129 p. (rus)
4. Botyan S.S., Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kreer L.A., Olesiyuk N.M., Pischenkov I.A. Otsenka nagreva stal'nykh nesushchikh elementov zdaniya s uchetom primykayushchikh konstruktsiy [Evaluation of heating of steel bearing elements of a building with regard to adjoining structures]. *Proc. VIII Intern. correspondence scientific-practical conf. «Problemy obespecheniya bezopasnosti lyudey pri pozhare i vzryve»*, Minsk, December 23, 2020. Minsk: University of Civil Protection, 2021. Pp. 15. (rus)
5. Golovanov V.I., Kryuchkov G.I. Otsenka ognestoykosti stal'nykh konstruktsiy pri normiruemykh temperaturnykh rezhimakh pozhara [Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes]. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2021. No. 3. Pp. 52–60. (rus). DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60. EDN: HGFYQF.
6. Gravit M.V. Otsenka porovogo prostranstva penokoksa ognezashchitnykh vspuchivayushchikhsya pokrytiy [Evaluation of pore space foam coke of intumescent fire retardant coating]. *Fire and explosion safety*, 2013. No. 5. P. 33–37. (rus). EDN: QIYYTX.

7. Yakovlev A.I. *Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruksiy* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 143 p. (rus)
8. Schleifer, V. Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall: dissertation ETH Nr. 18156. Zürich, 2009. 147 s. (deu). DOI: 10.3929/ethz-a-005771863.