

## Исследование влияния прогрева от второстепенных стальных конструкций без огнезащиты на предел огнестойкости стальных балок в огнезащите

© А.О. Воросин<sup>1,2</sup>✉, А.П. Парфененко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал Линде ГмбХ (Россия, 443001, г. Самара, ул. Галактионовская, 102)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В международной практике проектирования пассивной огнезащиты и согласно требованиям некоторых изготовителей огнезащиты рекомендуется наносить огнезащиту не только на основной элемент, для которого нормируется предел огнестойкости, но и на элементы, для которых отсутствуют требования по пределам огнестойкости. Примером могут служить поддерживающие кронштейны, опоры трубопроводов и прочие второстепенные строительные конструкции (ВСК), не являющиеся несущими элементами в соответствии с СП 2.13130.2020, которые крепятся к конструкциям в огнезащите. Для таких ВСК рекомендовано наносить огнезащиту (coatback of attachments) на длину не менее 450 мм от места крепления к конструкции в огнезащите при площади сечения ВСК более 3000 мм<sup>2</sup>. Данная практика устройства «дополнительной» огнезащиты в российском проектировании и нормативных документах по пожарной безопасности отсутствует.

**Предмет исследования.** Изменение предела огнестойкости стальных балок в огнезащите от прогрева ВСК в зависимости от их площади сечения и места крепления.

**Цель.** Оценить степень влияния площади сечения и места крепления ВСК при нагреве на предел огнестойкости стальных балок в огнезащите.

**Материалы и методы.** Численное моделирование проводилось с помощью программного комплекса ANSYS Workbench 2020 R2 (студенческая версия).

**Результаты.** Моделирование показало, что ВСК без огнезащиты при нагреве влияет на предел огнестойкости конструкций в огнезащите.

**Выводы.** В существующей методике расчета огнестойкости стальных конструкций не учитывается возможность снижения предела огнестойкости от прогрева ВСК без огнезащиты. Результаты численного моделирования показали, что при проектировании огнезащиты необходимо учитывать возможное снижение предела огнестойкости конструкций в огнезащите от прогрева ВСК без огнезащиты. Для дальнейшей проверки влияния ВСК без огнезащиты на время достижения предельного состояния стальной балки в огнезащите требуется проведение огневых испытаний, а также дополнительных исследований для оценки влияния прогрева от ВСК на вертикальные конструкции в огнезащите, в том числе с учетом углеводородного режима пожара.

**Ключевые слова:** пожар; тепловой поток; метод конечных элементов; теплотехнический расчет; предельное состояние; ANSYS

**Для цитирования:** Воросин А.О., Парфененко А.П. Исследование влияния прогрева от второстепенных стальных конструкций без огнезащиты на предел огнестойкости стальных балок в огнезащите // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 16–30. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.16-30

✉ Воросин Анатолий Олегович, e-mail: vorosin@gmail.com

## The research into the heating effect of secondary steel structures, having no fire proofing, on the fire resistance of fireproof steel beams

© Anatoliy O. Vorosin<sup>1,2</sup>✉, Aleksandr P. Parfenenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Branch of Linde GmbH (Galaktionovskaya St., 102, Samara, 443001, Russian Federation)

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

### ABSTRACT

**Introduction.** The international practice of passive fire protection design, as well as some manufactures of fireproofing products recommend to apply fire proofing substances not only to the main element, whose fire resistance limit is standardized, but also to the elements that do not fall under any fire resistance standards. Various support brackets, pipeline supports (hereinafter – PS), etc. can serve as examples. They are not

considered as bearing elements according to SP (Construction Regulations) 2.13130.2020, although they are connected to the structures that have fireproofing applied. It is recommended to apply fireproofing substances to such PS within the range of, at least, 450 mm from the point of attachment to the fireproof structure when the area of the PS cross section exceeds 3,000 mm<sup>2</sup>. No “supplementary” fireproofing is required by the Russian design and fire protection regulations.

**The subject of research.** A change in the fire resistance limit of steel *i*-girders, caused by the PS heating, depends on the area of the PS cross section and the location of the point of attachment.

**The goal.** The goal of the research is to analyze the effect, produced by the area of the cross section and the point of attachment, on the fire resistance limit of fireproof steel *i*-girders in the course of heating.

**Materials and methods.** ANSYS Workbench 2020 R2 (student version) was applied to perform the numerical simulation.

**Results.** The simulation has shown that the PS, having no fireproofing, influences the fire resistance limit of fireproof structures.

**Conclusions.** Currently available methods of analysis of the fire resistance of steel structures take no account of the fire resistance limit reduction, caused by the heating of the PS that has no fireproofing. The numerical simulation has shown that the fire proofing design must take account of the potential reduction in the fire resistance limit of fireproof structures, exposed to the heated PS that has no fire proofing. The further verification of the effect, produced by the PS, that has no fireproofing, on the time to the limit state of a fireproof steel *i*-girder requires fire tests and supplementary investigations to evaluate the influence of the PS on the heating of vertical fireproof constructions, including the case of the hydrocarbon fire mode.

**Keywords:** fire; heat flow; finite element method; thermal design; limit state; ANSYS

**For citation:** Vorosin A.O., Parfenenko A.P. The research into the heating effect of secondary steel structures, having no fire proofing, on the fire resistance of fireproof steel beams. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):16-30. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.16-30 (rus).

✉ Anatoliy Olegovich Vorosin, e-mail: vorosin@gmail.com

## Введение

В настоящее время на объектах нефтегазового комплекса применяется значительное количество различных сооружений (этажерки, здания, насосные, эстакады и т.п.) из стальных конструкций, для которых нормируется предел огнестойкости.

Пределом огнестойкости конструкций согласно Федеральному закону «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»<sup>1</sup> называется промежуток времени от начала огневого воздействия в условиях стандартных испытаний до наступления одного из нормированных для данной конструкции предельных состояний.

Например, для этажерок, выполненных из металла, согласно СП 4.13130.2013<sup>2</sup> п. 6.10.5.14, предел огнестойкости должен быть не менее: для колонн этажерки —  $R 120$ , для балок и ригелей —  $R 60$ , где  $R$  — предельное состояние по потере несущей способности.

Актуальность темы обусловлена малой изученностью в России влияния прогрева второстепенных строительных конструкций (ВСК) на время достижения предельного состояния стальных конструкций с нормируемым пределом огнестойкости. При



Рис. 1. Пример нанесения огнезащиты Promat на ВСК

Fig. 1. Applying Promat fire proofing to PS

этом нужно отметить, что в международной практике проектирования огнезащиты [1] и согласно требованиям некоторых изготовителей огнезащиты, например Promat<sup>3</sup> (рис. 1), рекомендуется наносить огнезащиту (coatback of attachments) на ВСК длиной 450 мм при площади сечения ВСК более 3000 мм<sup>2</sup>. Данная практика в российском проектировании отсутствует.

Примером ВСК (рис. 2) являются кронштейны под кабельные лотки, опоры технологических трубопроводов и прочие конструкции, не влияющие на устойчивость здания или сооружения при пожаре, и на которые, как правило, огнезащита не наносится.

<sup>1</sup> Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон Российской Федерации от 22 июня 2008 г. № 123-ФЗ ; принят Государственной Думой 4 июля 2008 г. ; утвержден Советом Федерации 11 июля 2008 г.

<sup>2</sup> Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям : (СП 4.13130.2013) : утвержден и введен в действие приказом МЧС России от 24 апреля 2013 г. № 288.

<sup>3</sup> A simple method for calculation of coat back lengths. URL: <https://www.pfpnet.com/wp-content/uploads/2019/02/Coat-Back-Lengths-PROMAT-Paper.pdf> (дата обращения: 24.11.2020).

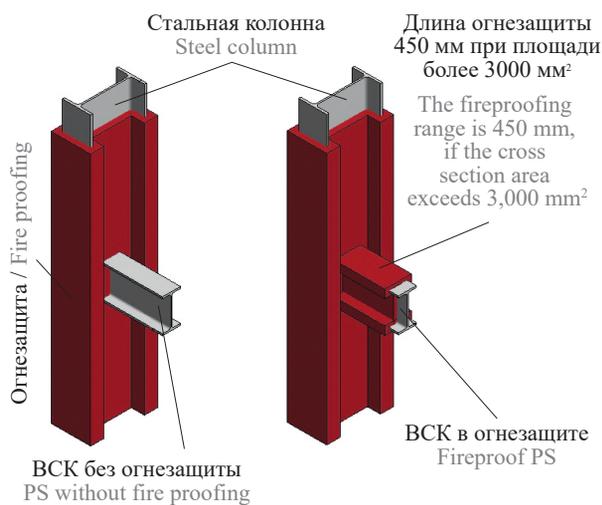


Рис. 2. Пример BCK с огнезащитой и без огнезащиты  
Fig. 2. Fireproof PS and PS that has not fireproofing

При исполнении работ по международным контрактам заказчики работ предъявляют требования к огнезащите согласно российскому законодательству, в котором отсутствуют требования по огнезащите BCK. При этом иностранные подрядчики готовы нести ответственность за работу только в том случае, если ее результат соответствует не только российским нормам, но и международным стандартам и лучшим практикам проектирования.

Проблема исследования состоит в том, что современные нормативные документы по пожарной безопасности и проектированию огнезащиты не учитывают возможность прогрева от BCK несущих стальных конструкций с нормируемым пределом огнестойкости, что влияет на снижение фактического предела огнестойкости конструкции.

Гипотеза: прогрев BCK влияет на предел огнестойкости несущих стальных конструкций.

Цель статьи — оценить степень влияния площади сечения и места крепления BCK при нагреве на предел огнестойкости стальных балок в огнезащите на основании моделирования в программном комплексе ANSYS.

### Обзор литературы

Основы принципа расчета строительных конструкций на огнестойкость заложены в работах А.И. Яковлева, В.И. Мурашева, А.Ф. Милованова, В.М. Ройтмана и др.

В работе [2] расчет огнестойкости стальных конструкций сводится к статическому (прочностная задача) и теплотехническому расчетам. В статическом расчете определяется критическая температура, при которой конструкция может нести нормативную нагрузку. В теплотехническом расчете на основании уравнения теплопроводности Фурье

определяется время (предел огнестойкости), за которое конструкция прогреется до критической температуры. Поскольку из-за высокой теплопроводности металла распределение температур по толщине принимают равномерным, это позволяет рассчитывать стержневые конструкции как одномерные пластины, у которых температура меняется только в одном направлении — по толщине пластины, а другая часть пластины имеет идеальную теплоизоляцию.

В работе [3] автор наряду с основной теорией огнестойкости рассматривает статический и кинематический подходы к решению прочностной задачи огнестойкости конструкций. По мнению автора, статический подход не дает возможности достаточно полно учитывать при оценках огнестойкости особенности температурных режимов реальных пожаров. Кинематический подход в отличие от статического позволяет учитывать не только температуру материала, но и длительность, и интенсивность воздействия пожарной нагрузки, т.е. всю термическую «историю» воздействия пожара. Согласно работе [4], автор также предлагает ввести понятие огнестойкости строительных материалов, основываясь на кинематической концепции о природе разрушения и прочности твердых тел. Кроме этого в работах [5, 6] при развитии теории огнестойкости конструкций, зданий и сооружений авторы предлагают учитывать комбинированные особые воздействия с участием пожара. К особым воздействиям можно отнести, например, чрезвычайные ситуации, связанные с террористическими актами и т.п.

В работе [7] авторы приводят методологию расчета огнестойкости центрально-нагруженных, изгибаемых и внецентренно нагруженных стальных элементов, а также общие положения теплотехнического расчета стальных конструкций. Авторы также указывают на недостатки отечественного метода испытаний на огнезащитную эффективность средств огнезащиты.

В 2018 г. были разработаны методические рекомендации СТО АРСС 11251254.001-018-03 «Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок»<sup>4</sup>. Расчет огнестойкости по данным рекомендациям сводится к решению прочностной и теплотехнической задач. Нужно отметить, что данный стандарт имеет статус нормативного документа по пожарной безопасности.

В работе [8] приводится методика определения требуемой толщины вспучивающегося покрытия на стальной конструкции для обеспечения заданного предела огнестойкости в зависимости от задан-

<sup>4</sup> СТО АРСС 11251254.001-018-03. Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок : утвержден приказом Генерального директора Ассоциации развития стального строительства № 08/01 от 30 августа 2018 г. и введен в действие с 3 сентября 2018 г.

ных значений дисперсии предела огнестойкости, приведенной толщины металла и доверительной вероятности. В работе [9] исследуется влияние углеводородного пожара на пределы огнестойкости незащищенных конструкций. Доказано, что при различных температурных режимах пожара конструкции будут иметь различный предел огнестойкости.

В работе [10], согласно выполненному расчету, в программном комплексе SCAD автор указывает на недостатки при определении пределов огнестойкости по критическим температурам по европейским нормам.

Согласно СП 2.13130.2020<sup>5</sup>, пределы огнестойкости несущих конструкций в огнезащите могут быть определены экспериментальным путем по ГОСТ 30247.1–94<sup>6</sup> или расчетно-аналитическим методом с учетом экспериментальных данных огнезащитной эффективности средств огнезащиты и дополнительных испытаний колонн и балок в огнезащите под воздействием нагрузок по ГОСТ Р 53295–2009<sup>7</sup>. Расчетно-аналитический метод состоит из совместного решения прочностной задачи с учетом заданных условий нагружения и опирания конструкции и тепло-технической задачи.

В общем случае обеспечение требуемого предела огнестойкости достигается применением теплоизоляционного покрытия необходимой толщины, обеспечивающего тепловую защиту металлических конструкций от воздействия тепловой нагрузки [11].

Во всех приведенных выше работах не учитывается возможное влияние прогрева ВСК на предел огнестойкости стальных конструкций в огнезащите, что рекомендовано учитывать в международной практике проектирования.

В двух наиболее известных международных исследованиях [12, 13] по данной теме содержатся различные выводы о влиянии прогрева второстепенных металлических конструкций на стальные балки.

В работе [12] авторы исследуют влияние прогрева основной балки из двутавра HEA 240 в огнезащите от второстепенных балок из двутавра HEA-10 без огнезащиты. Причем второстепенные балки были приварены с шагом 600 мм с обеих сторон стенки основ-

ной балки. Количество второстепенных балок HEA-10 — 7 шт. На все второстепенные балки действовал углеводородный режим пожара с учетом Норвежских норм. К основной балке прикладывалась сосредоточенная нагрузка 92 кН, при которой напряжение составляло 150 МПа (42 % от предела текучести). Нагрузка снижалась постепенно до 30 кН с шагом 10 кН после выявления прогиба в 30 мм на 50-й минуте эксперимента. В ходе эксперимента было выявлено, что при отсутствии огнезащиты на второстепенных балках основная балка несет нагрузку 100 кН·м на 3 мин меньше, чем если бы все балки были в огнезащите, т.е. установлено незначительное влияние прогрева на основную балку через второстепенные балки без огнезащиты. По мнению авторов, результат эксперимента показал, что длина огнезащиты второстепенных балок может быть уменьшена по сравнению со стандартной длиной 450 мм, если предельное состояние рассматривать по пределу текучести, а не по температуре.

В работе [13] авторы исследуют влияние прогрева на основную балку из составного двутавра 240 (толщина стенки и полок 12 мм) от второстепенных балок из трубы квадратного профиля. Причем второстепенные балки приварены с шагом 1000 мм с обеих сторон стенки основной балки. Количество второстепенных балок — 4 шт. Основная балка в огнезащите, второстепенные балки моделировались без огнезащиты и в огнезащите различной длины (30, 45, 60, 100 см). На все балки действовала пожарная нагрузка 200 кВт/м<sup>2</sup>. К основной балке была приложена равномерно распределенная нагрузка 30 кН/м. Также дополнительно были исследованы нагрузки 15, 22,5 и 37,5 кН/м. Авторы считают, что длина огнезащиты 450 мм второстепенных балок является оптимальной, и нанесение огнезащиты длиной более 450 мм на второстепенные балки не оказывает существенного влияния на повышение температуры основной балки. Использование огнезащиты на второстепенных балках эффективно при действии больших нагрузок на основную балку.

Моделирование конструкций в работах [12, 13] было выполнено методом конечных элементов в программном комплексе USFOS.

В работе [14] выполнены исследования о подборе необходимой длины огнезащиты ВСК при условии, что несущая конструкция не должна нагреваться до температуры более 500 °С (критерий предельного состояния — достижение конструкцией критической температуры, а не деформации или разрушения). Авторы также установили факторы, которые влияют на выбор длины огнезащиты ВСК. Моделирование огнезащиты в работе выполнено методом конечных элементов в программном комплексе ABAQUS.

В работе [15] группа авторов анализирует оптимизацию устройства огнезащиты для нефтехим-

<sup>5</sup> Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты : (СП 2.13130.2020) : утвержден и введен в действие приказом МЧС России от 12 марта 2020 г. № 151.

<sup>6</sup> ГОСТ 30247.1–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации и техническому нормированию в строительстве (МНТКС) 17 ноября 1994 г.

<sup>7</sup> ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 февраля 2009 г. № 71-ст.

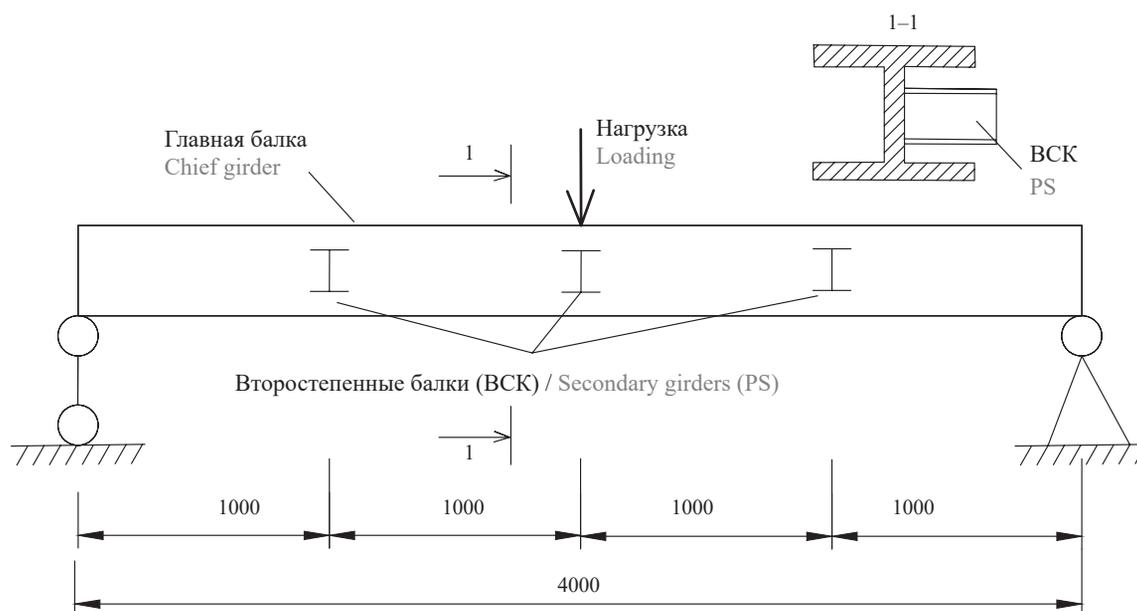


Рис. 3. Расчетная схема

Fig. 3. Design pattern

мических производств, в том числе исследуется влияние прогрева ВСК на несущую способность нагруженной колонны. Согласно выполненного ими расчета в программном комплексе ABAQUS, длина огнезащиты ВСК может быть уменьшена до 200 мм, а на отдельных участках вообще удалена.

В исследованиях [12–15] недостатком является отсутствие анализа влияния площади сечения ВСК и места ее крепления на время достижения предельного состояния.

В работах [16, 17] авторы выполняют анализ влияния частичной огнезащиты стальной балки на ее прогрев при моделировании углеводородного сценария пожара. Моделирование выполнялось в программных комплексах ABAQUS и FANTUS/USFOS соответственно. Согласно результатам исследования, сделан вывод о том, что частичная огнезащита (с трех сторон) допускается для использования только в технически обоснованных случаях при условии подтверждения расчетом устойчивости балок как по отдельности, так и по всей геометрической системе в целом.

В работе [18] авторы выполняют анализ прогрева стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности. Моделирование выполнялось в программном комплексе ANSYS. По результатам исследования предложена расчетная модель, которую можно использовать для прогнозирования прогрева как полностью, так и частично защищенных стальных конструкций вспучивающимся огнезащитным составом.

Исследования [16–18] направлены на изучение влияния прогрева на стальные конструкции с частичной огнезащитой.

### Методика проведения исследования

Моделирование осуществлялось методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS Workbench 2020 R2 (студенческая версия) с учетом ограничения по количеству узлов/элементов до 32 000. Теплотехнический расчет выполнен в модуле Transient Thermal. Результаты расчета (тепловые поля, распределенные во времени) импортированы в модуль Static Structural. Предел огнестойкости основной конструкции (главной балки) изначально принят  $R 120$ . Расчетная схема приведена на рис. 3. Общий вид модели приведен на рис. 4.

Принятые сечения балок:

- главная балка — двутавр 20Б1 по ГОСТ Р 57837–2017<sup>8</sup> с толщиной стенки 5,5 мм и толщиной полки 8 мм. Высота двутавра — 200 мм, ширина — 100 мм;
- второстепенная балка (BCK) — составной двутавр с толщиной стенки и полок 5 мм. Высота двутавра — 100 мм, ширина — 50 мм.
- Свойства материалов:
- марка стали для главной и второстепенных балок принята ВСтЗпс по ГОСТ 380–2005<sup>9</sup>;

<sup>8</sup> ГОСТ Р 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 2017 г. № 1515-ст.

<sup>9</sup> ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 28 от 9 декабря 2005 г.).

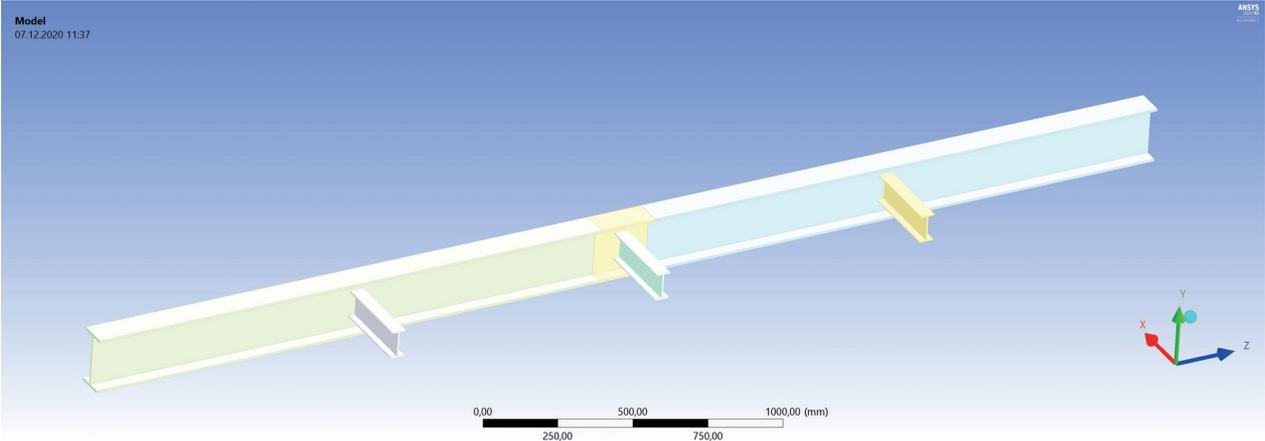


Рис. 4. Общий вид 3D модели

Fig. 4. The general view of the 3D model

- предел текучести и временное сопротивление в зависимости от температуры приняты по экспериментальным данным из работ [19, 20];
- модуль упругости стали при температуре 20 °С принят 210 000 МПа. Изменение модуля упругости в зависимости от температуры принято по стандарту СТО АРСС 11251254.001-018-03;
- коэффициент Пуассона принят 0,3;
- теплопроводность стали принята 53,3 Вт/(м · °С) при температуре 20 °С. Изменение теплопроводности в зависимости от температуры принято по линейному закону согласно стандарту EN 1993-1-2: 2005<sup>10</sup>;
- теплоемкость стали принята 440 Дж/(кг · °С) при температуре 20 °С. Изменение теплоемкости в зависимости от температуры принято по линейному закону согласно стандарту EN 1993-1-2:2005;
- свойства ползучести заданы аналогично работе [21] по закону Нортона (степенной закон) через параметр Зинер-Холломона (Z) с учетом влияния изменения температуры по Аррениусу [22]:

$$Z = \epsilon_{cr} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = C_1 \sigma^{C_2}; \quad (1)$$

$$\epsilon_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = C_1 \sigma^{C_2} e^{-\frac{C_3}{T}}; \quad (2)$$

$$C_3 = \left(\frac{Q}{R}\right), \quad (3)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $R = 8,31$  Дж/(моль · К);

$T$  — абсолютная температура, К;

$Q$  — энергия активации, кДж/моль;

$C_1, C_2$  — константы материала.

<sup>10</sup> EN 1993-1-2:2005+AC 2005 (E) Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: General rules. Structural fire design (Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости).

Таблица 1. Константы ползучести

Table 1. Constant values of creep

Температура, К Temperature, K	Константы Constant values		
	$C_1$	$C_2$	$C_3$
873	3,74	4,3	27 200
773	0,000 148 843	6,43	27 200

Константы  $C_1, C_2$  получены методом наименьших квадратов путем аппроксимации экспериментальных данных из работ [19, 20].

Константа  $C_3$  принята из работы [19].

**Теплотехнический расчет.** Главная балка моделируется в программном продукте ANSYS без теплоизоляционного слоя огнезащиты. Вместо огнезащиты подобран специальный тепловой поток, который обеспечивает нагрев главной балки в течение 120 мин до температуры, не превышающей критическую, равную 350 °С, без учета влияния ВСК. При этом динамика нагрева главной балки аналогична стандартным испытаниям по ГОСТ 30247.0–94. Критическая температура определена при сосредоточенной нагрузке 3,5 т. Влияние прогрева от ВСК моделируется путем огневого воздействия на второстепенные балки через конвекцию и излучение. Далее нагретая второстепенная балка передает тепло на главную балку.

**Статический расчет.** К середине главной балки приложена сосредоточенная нагрузка 3,5 т. Площадь поверхности опирания составляет 20 см<sup>2</sup>. Нагрузка действует постоянно в течение 120 мин без изменений во времени. Расчет выполнен с учетом изменения свойств материала из-за температуры во времени.

### Результаты исследования

**Теплотехнический расчет.** Задача теплотехнического расчета — получить распределение температурных полей в главной балке от действия пожарной нагрузки (прямой, действующей на главную

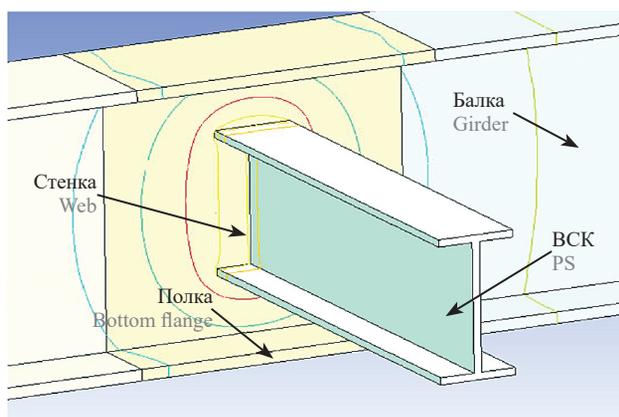


Рис. 5. Места измерения температуры

Fig. 5. Points of thermometry

балку и через второстепенные балки без огнезащиты). С точки зрения наиболее значимых для дальнейшего статического расчета мест по деформациям выбраны нижняя полка двутавра основной балки и грань стенки двутавра ВСК в середине крепления к основной балке, где действует максимальный изгибающий момент (рис. 5).

Распределение температуры по главной балке, ВСК, а также в месте стыковки ВСК и главной балки по стенке и полке главной балки приведено на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что температура стенки главной балки в месте примыкания ВСК («Стенка») больше температуры полки главной балки («Полка»). На 120-й минуте эта разница составляет 261 °С.

Критическая температура 350 °С для стенки достигается на 6-й минуте, для полки (где действуют максимальные напряжения) — на 17-й минуте (табл. 2).

Таблица 2. Время достижения температуры в стенке и полке главной балки

Table 2. The time needed by the web and the bottom flange of the girder to reach the temperature

Температура, °С Temperature, °С	Время достижения температуры, мин Time-to-temperature, min	
	Стенка Web	Полка Bottom flange
350	6	17
400	7	21
450	9	32
500	12	47
550	16	65
600	22	89
650	29	118
654	—	120
700	39	—
750	51	—
800	68	—
850	86	—
900	110	—
915	120	—

Максимальная температура в полке составляет 654 °С.

Максимальная температура в стенке составляет 915 °С.

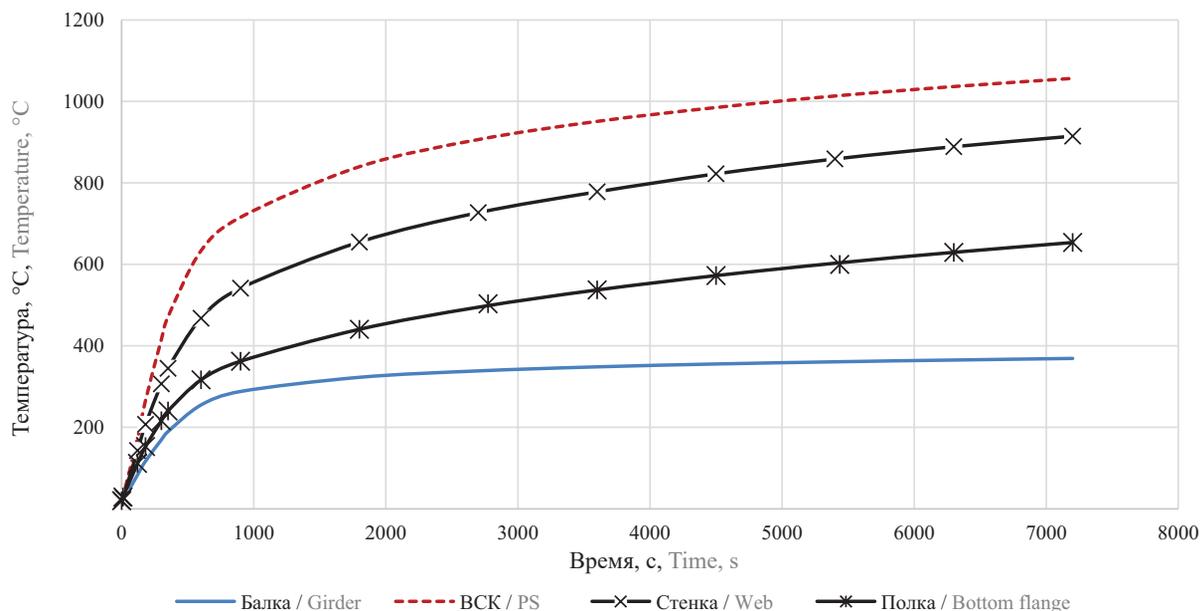


Рис. 6. Распределение температуры во времени согласно теплотехническому расчету

Fig. 6. The time-temperature distribution pursuant to the thermal design

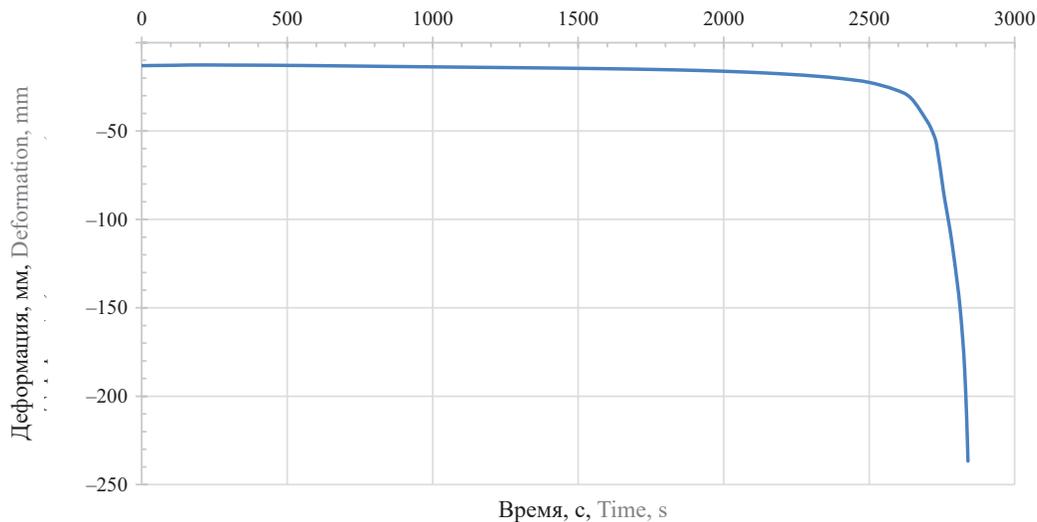


Рис. 7. Деформация балки в зависимости от времени

Fig. 7. Time-dependent beam deformation

**Статический расчет.** Задача статического расчета — определить деформации главной балки от совместного действия статической нагрузки с учетом полученных температурных полей из теплотехнического расчета.

Деформация балки (прогиб) в случае отсутствия огневого воздействия составляет 13 мм.

Деформации балки с учетом огневого воздействия в зависимости от времени приведены на рис. 7, с учетом огневого воздействия в зависимости от температуры — на рис. 8.

Согласно выполненному расчету: прогиб балки в нижней полке на 30-й минуте (1800 с) составляет 15 мм; прогиб балки в нижней полке на 45-й минуте (2700 с) — 45 мм; прогиб балки в нижней полке на 47-й минуте (2840 с) — 237 мм. Вертикальные деформации по оси  $Y$  на 47-й минуте приведены на рис. 9.

Согласно ГОСТ 30247.1–94, предельной деформация главной балки считается при следующих условиях:

- прогиб достиг величины 20 см;
- или скорость нарастания деформации достигла 0,89 см/мин.

Из рис. 7 следует, что предельная деформация, равная 20 см, достигается на 47-й минуте. При этом скорость нарастания деформации составляет 37,1 см/мин, что больше предельно допустимой скорости нарастания деформации 0,89 см/мин.

Скорость нарастания деформации 0,89 см/мин достигается на 44-й минуте.

Время достижения предельного состояния по условию нарастания скорости нарастания деформации принято 44 мин.

Предельное состояние в большей степени достигается за счет потери устойчивости верхней

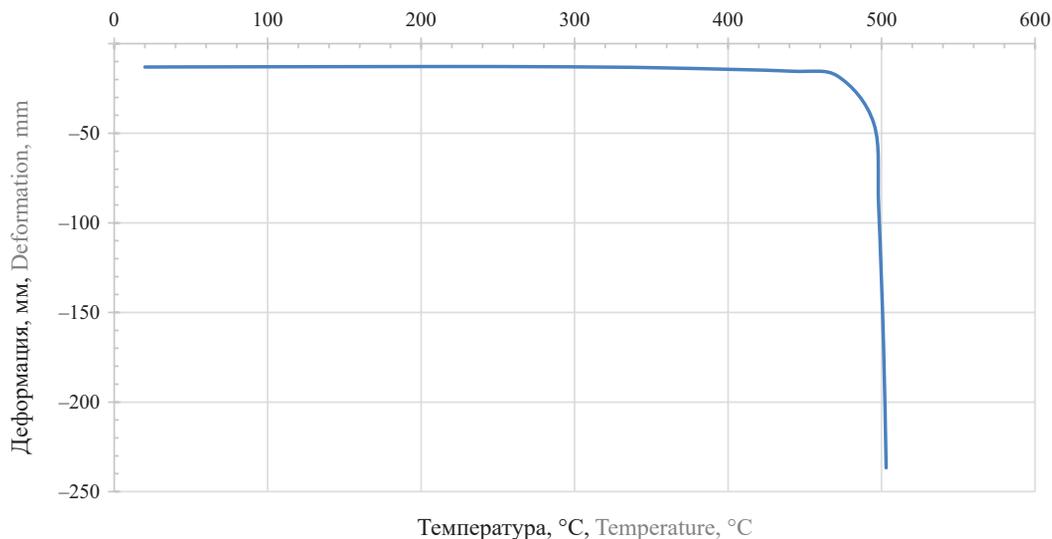


Рис. 8. Деформация балки в зависимости от температуры

Fig. 8. Temperature-dependent beam deformation

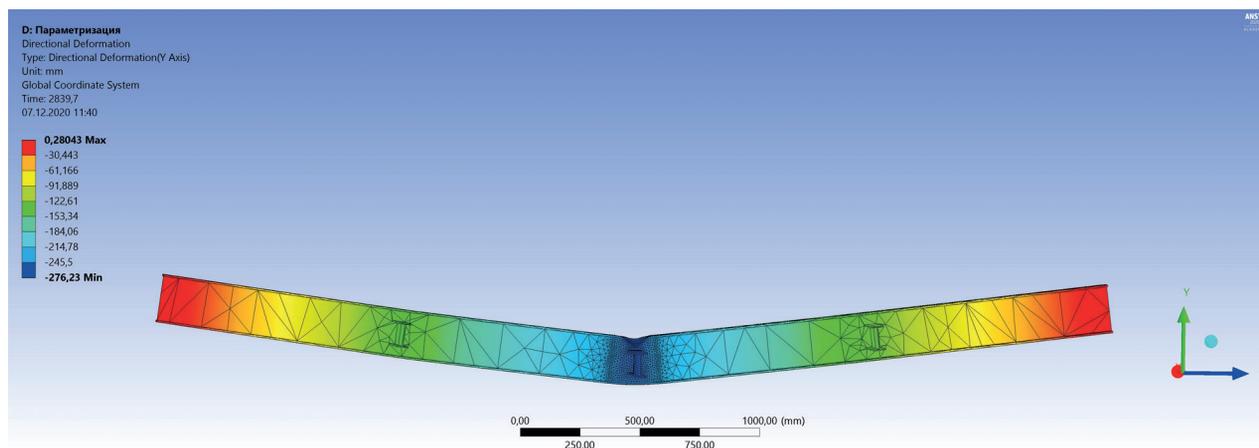


Рис. 9. Деформации по оси  $Y$  на 47-й минуте

Fig. 9. Deformation along the vertical axis at the 47th minute

полки главной балки и образования пластического шарнира. В нижней полке балки происходит рост напряжений до предельно возможных по временно-му сопротивлению. В результате происходит резкий прогиб балки при температуре 500 °С.

**Дополнительные исследования анализа влияния площади сечения ВСК.** В дополнении к основному расчету, где ВСК (I10) имела площадь сечения 9,5 см<sup>2</sup>, проведен расчет для ВСК (I5) площадью сечения 3,12 см<sup>2</sup>. При этом огневое воздействие и статическая нагрузка остаются такими же, как и для основного варианта с ВСК (I10). Сечение ВСК — составной двутавр. Ширина полки — 30 мм, высота сечения — 50 мм, толщина стенки и полочек — 3 мм.

Согласно выполненному расчету, прогиб балки в нижней полке на 60-й минуте составляет 20 мм; прогиб балки в нижней полке на 75-й минуте составляет 60 мм; прогиб балки в нижней полке на 85-й минуте составляет 556 мм. Вертикальные деформации по оси  $Y$  на 85-й минуте (5086 с) приведены на рис. 10.

Согласно результатам выполненного расчета, максимальная деформация 55,6 см больше пре-

дельно допустимой, которая равна 20 см, при этом максимальная скорость нарастания деформации составляет 333,8 см/мин, что больше предельно допустимой скорости нарастания деформации, равной 0,89 см/мин.

Деформация 20 см достигается на 80-й минуте, скорость нарастания деформации 0,89 см/мин — на 75-й минуте.

Время достижения предельного состояния по условию нарастания скорости деформации принято 75 мин.

В случае крепления ВСК с площадью сечения 3,12 см<sup>2</sup> время достижения предельного состояния составляет 75 мин, что менее 120 мин, т.е. предел огнестойкости, составляющий 120 мин, так же как и при креплении ВСК площадью сечения 9,5 см<sup>2</sup>, не обеспечивается.

Предельное состояние в большей степени достигается за счет образования пластического шарнира и поворота сечения в левой и средней ВСК, а также за счет потери устойчивости верхней полки главной балки. В нижней полке балки происходит рост на-

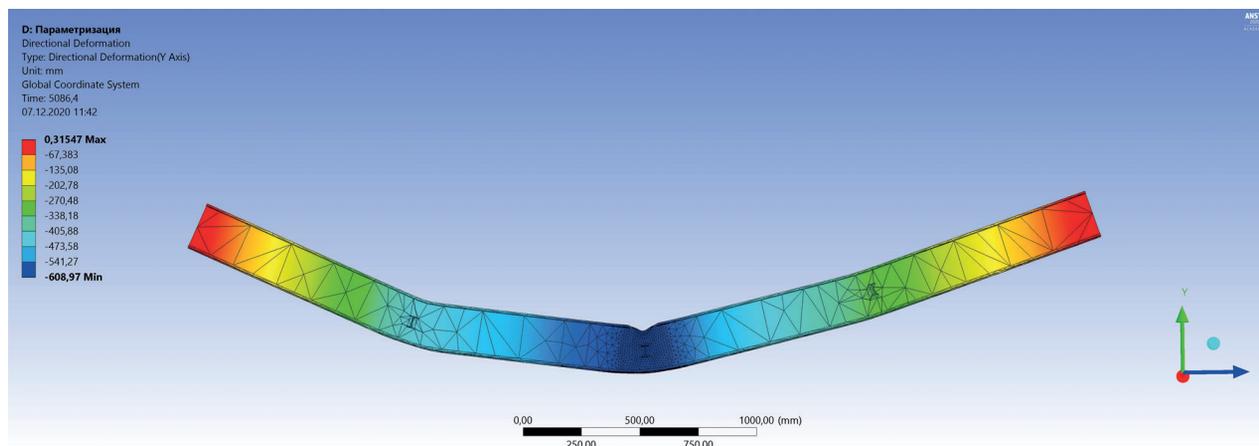
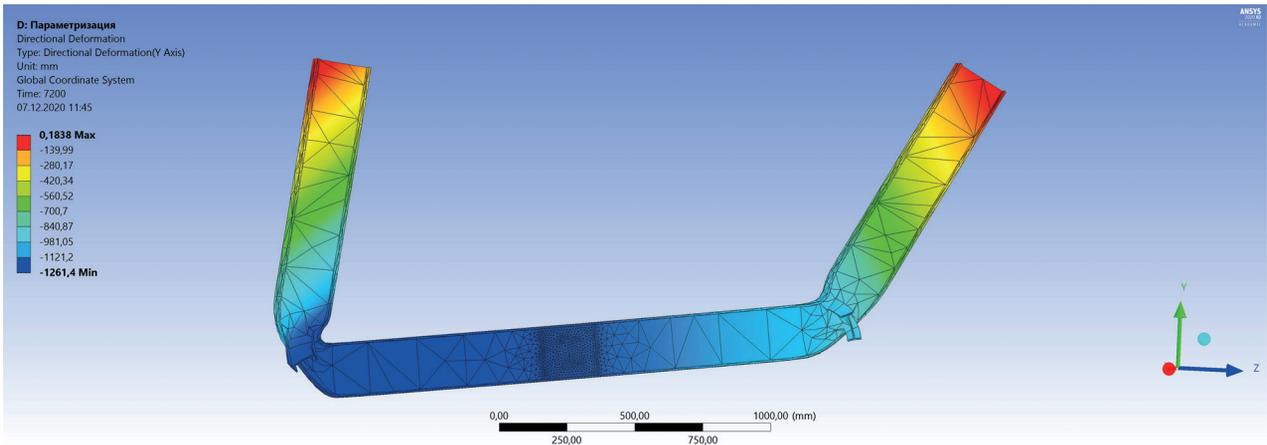


Рис. 10. Деформации по оси  $Y$  на 85-й минуте

Fig. 10. Deformation along the vertical axis at the 85th minute



**Рис. 11.** Деформации по оси «У» на 120-й минуте  
**Fig. 11.** Deformation along the vertical axis at the 120th minute

пряжений до предельно возможных по временному сопротивлению. В результате происходит резкий прогиб балки при температуре 500 °С на 85-й минуте.

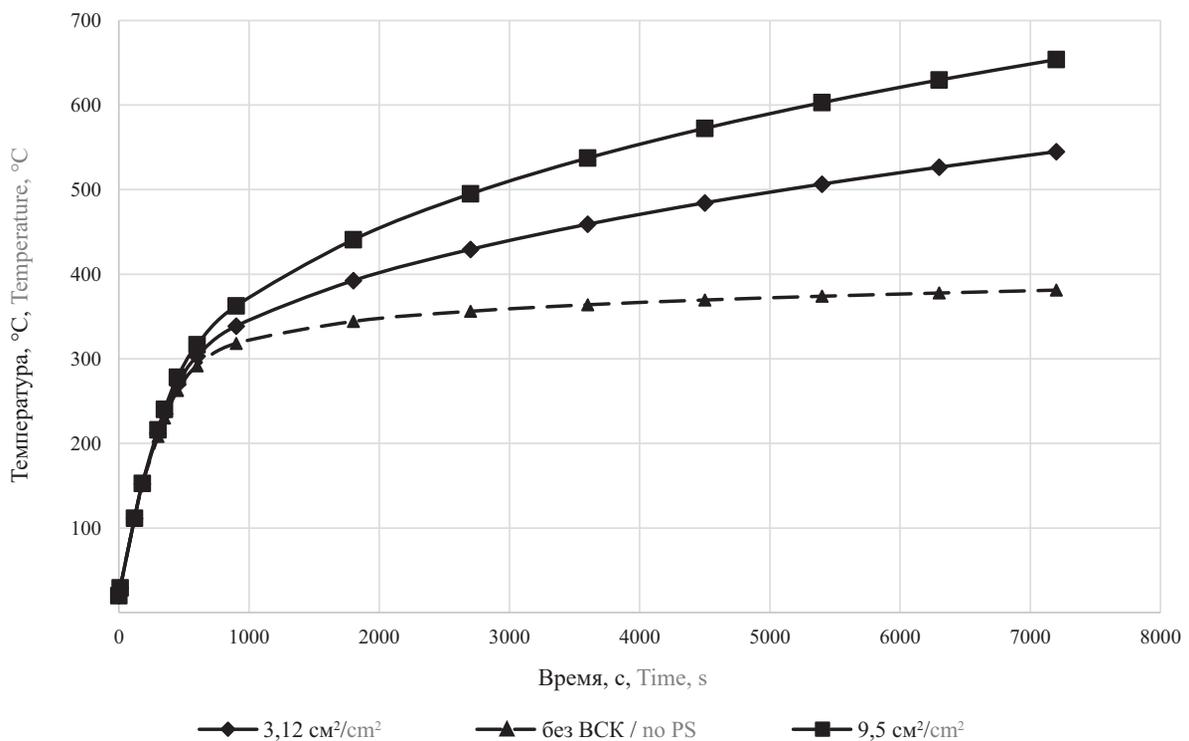
**Дополнительные исследования анализа влияния места крепления ВСК.** В дополнении к основному расчету, где главная балка имела три точки крепления ВСК (П10), выполнен расчет с отсутствием ВСК(П10) в средней части главной балки, где действуют максимальные напряжения.

Согласно результатам выполненного расчета, прогиб балки в нижней полке на 60-й минуте составляет 290 мм; прогиб балки в нижней полке на 120-й

минуте — 1128 мм. Вертикальные деформации по оси Y на 120-й минуте приведены на рис. 11.

Из результатов выполненного расчета следует, что максимальная деформация 112,8 см больше предельно допустимой, равной 20 см, при этом максимальная скорость нарастания деформации составляет 9,3 см/мин (на 65-й минуте), что больше предельно допустимой скорости нарастания деформации 0,89 см/мин.

Деформация 20 см достигается на 57-й минуте, скорость нарастания деформации 0,89 см/мин — на 49-й минуте.



**Рис. 12.** Распределение температуры в середине нижней полки балки  
**Fig. 12.** Temperature distribution over the middle part of the bottom flange

**Таблица 3.** Результаты анализа времени достижения предельного состояния для трех случаев крепления ВСК  
**Table 3.** The results of attaining time analysis for 3 cases of SSS attachment

Варианты крепления ВСК PS attachment options	Площадь ВСК, см <sup>2</sup> PS area, cm <sup>2</sup>	Количество ВСК, шт. Number of PSs, pcs	Время достижения предельного прогиба 20 см, мин Time to the maximal deflection of 20 cm, min	Время достижения предельной скорости 0,89 см/мин, мин Time to the maximal velocity of 0.89 cm/min, min	Принятое время достижения предельного состояния, мин Standard time to the limit state, min
1	9,5	3	47	44	44
2	3,12	3	80	75	75
3	9,5	2	57	49	49

Время достижения предельного состояния по условию нарастания скорости деформации принято 49 мин.

В случае отсутствия крепления ВСК в середине балки время достижения предельного состояния составляет 49 мин, что менее 120 мин, т.е. предел огнестойкости в 120 мин, так же как и при креплении ВСК в середине балки, не обеспечивается. Предельное состояние в большей степени достигается за счет образования пластического шарнира в местах крепления ВСК и поворота сечения. Нарастание прогиба балки начинается при температуре 522 °С.

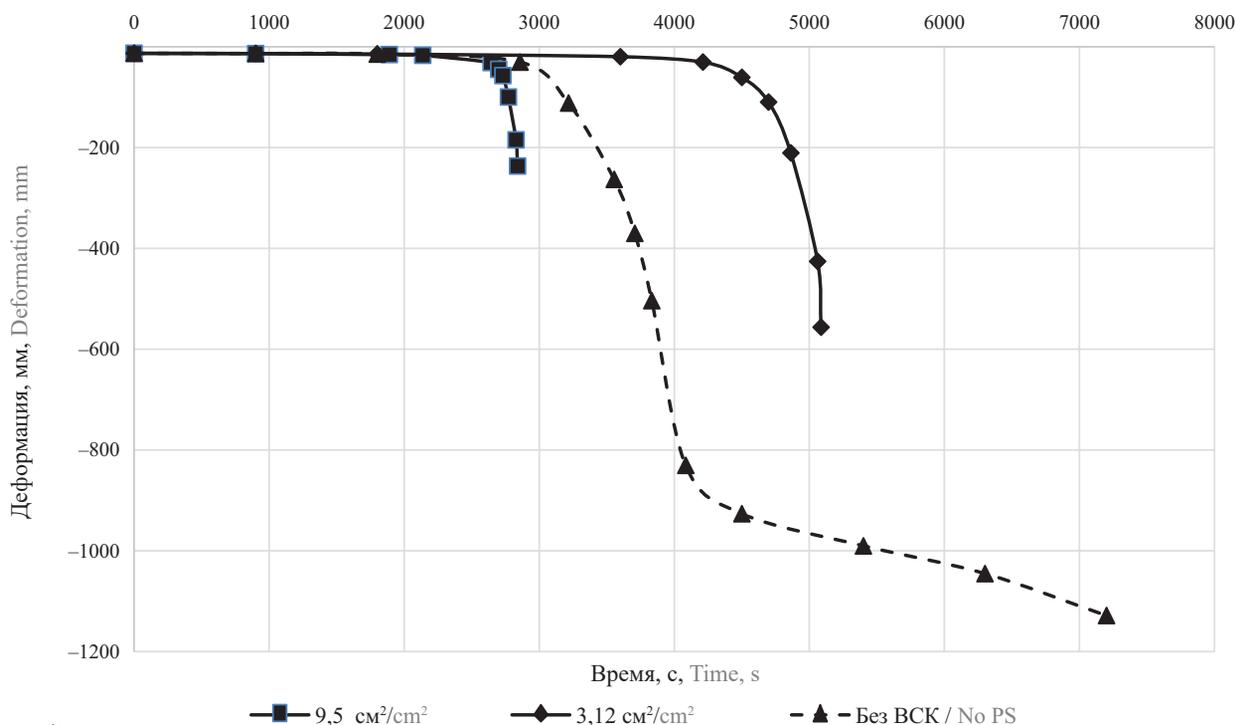
**Сравнение результатов расчетов.** Исследования влияния прогрева выполнялись для трех случаев крепления ВСК:

- три ВСК (I10) площадью сечения 9,5 см<sup>2</sup> (основной случай);
- три ВСК (I5) площадью сечения 3,12 см<sup>2</sup>;
- две ВСК (I10) площадью сечения 9,5 см<sup>2</sup>. ВСК в середине балки отсутствует.

Анализ прогрева в середине нижней полки балки для трех случаев крепления ВСК показан на рис. 12.

Как видно из рис. 12, максимальная температура 654 °С достигается в нижней полке основной балки при креплении ВСК площадью сечения 9,5 см<sup>2</sup> (первый случай). Минимальная температура составляет 381 °С для случая отсутствия ВСК в середине балки (третий случай).

Нужно отметить, что для третьего случая температура двух крайних ВСК одинакова с темпера-



**Рис. 13.** Деформации в зависимости от времени

**Fig. 13.** Time-deformation curve

турой тех же точек в первом случае и составляет 690 °С.

Во втором случае максимальная температура в нижней полке балки составляет 545 °С.

Анализ времени достижения предельного состояния в зависимости от случая крепления ВСК приведен в табл. 3. Деформации в зависимости от времени представлены на рис. 13.

Прогрев от ВСК оказывает влияние на время достижения конструкцией предельного состояния и соответственно на предел ее огнестойкости.

По условию достижения предельно допустимой скорости нарастания деформации снижение предела огнестойкости составляет:

- для ВСК площадью сечения 9,5 см<sup>2</sup> — 76 мин (со 120 до 44 мин);
- для ВСК площадью сечения 3,12 см<sup>2</sup> — 45 мин (со 120 до 75 мин);
- для случая отсутствия ВСК в середине балки, где действуют максимальные напряжения, — 71 мин (со 120 до 49 мин).

По сравнению с предельно допустимой деформацией 200 мм предельно допустимая скорость нарастания деформации достигается в среднем на 3...8 мин раньше.

Прогрев от ВСК с меньшей площадью сечения (3,12 см<sup>2</sup> вместо 9,5 см<sup>2</sup>) также оказывает влияние на время достижения конструкции предельного состояния и соответственно на предел огнестойкости. В случае уменьшения площади сечения ВСК с 9,5 до 3,12 см<sup>2</sup> увеличивается время прогрева до критических температур и соответственно увеличивается время достижения предельного состояния.

Несмотря на отсутствие ВСК в зонах с напряжением более 70 % от предела текучести (в середине балки) прогрев оказывает влияние на участки с напряжением менее 50 %. Например, в левой части крепления ВСК, где напряжение составляет примерно 100...114 МПа, пластические деформации начинают развиваться при температуре более 550 °С, так как предел текучести при данной температуре составляет 110 МПа. Соответственно основной причиной значительного прогиба, равного 1128 мм, для третьего случая является образование двух шарниров пластичности и поворот сечения главной балки в этих шарнирах.

## Выводы

Рассмотрена существующая методика расчета огнестойкости стальных конструкций. В данной методике не учитывается возможность снижения предела огнестойкости от прогрева ВСК без огнезащиты.

Исследовано влияние прогрева от ВСК без огнезащиты на предел огнестойкости конструкций в огнезащите. В дополнении к международным исследованиям произведена оценка влияния прогрева в зависимости от площади сечения и места крепления ВСК.

Численное моделирование выявило, что во всех рассмотренных случаях прогрев от ВСК оказывает влияние на деформации главной балки даже при наличии огнезащиты на главной балке.

Рекомендация из международной практики наносить огнезащиту на ВСК длиной 450 мм при площади сечения ВСК более 3000 мм<sup>2</sup> нецелесообразна, так как в практике строительства встречаются сечения различной высоты. Так, для первого случая, где рассмотрена ВСК площадью сечения 950 мм<sup>2</sup>, прогрев оказывает существенное влияние на предел огнестойкости и требует огнезащиты ВСК, даже если площадь сечения в данном случае менее 3000 мм<sup>2</sup>.

Для дальнейшей проверки влияния ВСК без огнезащиты на время достижения предельного состояния стальной балки в огнезащите требуется проведение экспериментальных исследований.

Необходимы также дополнительные исследования для оценки влияния прогрева от ВСК на вертикальные конструкции в огнезащите, в том числе с учетом углеводородного режима пожара.

На основании выполненного исследования можно предложить следующие рекомендации:

- к существующей методике расчета огнестойкости и нормативным документам по пожарной безопасности добавить требование о проверке влияния прогрева от второстепенных стальных конструкций без огнезащиты на предел огнестойкости;
- в случае, если по результатам проверки прогрев влияет на предел огнестойкости, необходимо предусмотреть огнезащиту для ВСК;
- необходимо подбирать требуемую длину огнезащиты для ВСК.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guidance on passive fire protection for process and storage plant and equipment. Energy Institute, 2017. 115 p.
2. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 144 с.
3. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.

4. *Ройтман В.М.* Огнестойкость строительных материалов как базовая характеристика кинетической теории огнестойкости // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация.* 2019. Вып. 1. С. 62–69.
5. *Ройтман В.М., Серков Б.Б., Приступнюк Д.Н.* Направления развития теории огнестойкости конструкций, зданий и сооружений с учетом комбинированных особых воздействий с участием пожара // *XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России : в 2-х ч. Ч. 2: Горение и проблемы тушения пожаров : тез. докл. М. : ВНИИПО, 2017. С. 42–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29942736>*
6. *Ройтман В.М., Голованов В.И.* Необходимость технического регулирования огнестойкости зданий с учетом возможности комбинированных особых воздействий с участием пожара // *Пожарная безопасность/Fire Safety.* 2014. № 1. С. 86–93.
7. *Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В.* Оценка качества нанесения средств огнезащиты на стальные конструкции зданий и сооружений различного функционального назначения // *Пожарная безопасность/Fire Safety.* 2015. № 3. С. 74–82.
8. *Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Зубань А.В.* Определение требуемой толщины вспучивающегося огнезащитного покрытия на стальных конструкциях для заданных пределов огнестойкости // *Пожарная безопасность/Fire Safety.* 2020. № 1. С. 26–29.
9. *Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю.* Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // *Пожаро-взрывобезопасность/Fire and Explosion Safety.* 2019. Т. 28. № 6. С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
10. *Перельмутер А.В.* Расчет огнестойкости стальных конструкций // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering/Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций.* 2019. Т. 15. № 1. С. 110–118. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-1-110-118 URL: <https://ijccse.iasv.ru/index.php/ijccse/article/view/195>
11. *Молчадский И.С.* Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
12. *Amdahl J., Holmas T., Skallerud B.* Ultimate strength of structural members with attachments during accidental fires // *International Conference Response of Structures to Extreme Loading.* Toronto, Canada. 2003.
13. *Friebe M., Jang B.S., Jim Y.* A parametric study on the use of passive fire protection in FPSO topside module // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.* 2014. Vol. 6. Pp. 826–839. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0216
14. *Podolski D., Wang Y.-C., Yuan J.* Numerical investigation of intumescent ‘coatback’ on unprotected secondary beams // *Applications of Fire Engineering — Proceedings of the International Conference of Applications of Structural Fire Engineering, ASFE.* 2017. Pp. 161–170.
15. *Necip Onder Akinci, Krishna Parvathaneni, Abhimanyu Kumar, Hyun-Su Kim, Michael Stahl, Xiaowei Dai.* Advanced Fire Integrity Analysis and PFP Optimization Methods for Petrochemical Facilities // *21st Annual international Symposium October, Texas.* 2018.
16. *Munoz-Garcia E.* Analysis and design challenges and solutions of 3 sided passive fire protection PFP on steel beam desks for offshore installations // *Offshore Technology Conference Asia.* 2016. DOI: 10.4043/26623-MS
17. *Imran M., Liew M.S., Nasif M.S., Munoz Garcia E., Danyaro K.U., Niazi M.U.* Thermal and mechanical response of partially protected steel I-beams under fire // *MATEC Web of Conference.* 2018. Vol. 203. P. 06009. DOI: 10.1051/mateconf/201820306009
18. *Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Олесюк Н.М.* Прогрев стержневых стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности при огневом воздействии // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси.* 2020. Т. 4. № 1. С. 20–31. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.20
19. *Пехотиков А.В.* Огнестойкость изгибаемых стальных конструкций : дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 198 с.
20. *Голованов В.И.* Прогнозирование огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2008. 337 с.
21. *Wang W., Zhang L.* An approach for evaluating fire resistance of steel beams considering creep effect // *Procedia Engineering.* 2017. Vol. 210. Pp. 544–550. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.11.112

22. Ишимов А.С., Барышников М.П., Чукин М.В. К вопросу выбора математической функции уравнения состояния для описания реологических свойств стали 20 в процессе горячей пластической деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. Вып. 1. С. 43–52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23166465>

## REFERENCES

1. *Guidance on passive fire protection for process and storage plant and equipment*. Energy Institute, 2017; 115.
2. Yakovlev A.I. *The calculation of fire resistance of steel structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 144. (rus).
3. Roytman V.M. *The engineering solutions for fire resistance evaluation of designed and reconstructed buildings*. Association “Fire safety and science”, 2001; 382. (rus).
4. Roytman V.M. Fire resistance of building material as a basic characteristic of fire resistance kinetic theory. *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya/Fires and emergencies: prevention, elimination*, 2019; 1:62-69. (rus).
5. Roytman V.M., Serkov B.B., Pristupnyk D.N. A way forward of fire resistance theory development of structures, buildings and frame structures considering combining special loads together with fire. *XXIX International Scientific-Practical Conference, dedicated to 80th anniversary of FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia : in 2 parts. Part 2: Combustion and problems of extinguishing fires : abstracts. Report*. Moscow, VNIPO, 2017; 42-45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29942736> (rus).
6. Roytman V.M., Golovanov V.I. Need for technical regulation of the buildings fire resistance taking into account the possible combined hazardous fire exposure. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire safety*. 2014; 1:86-93. (rus).
7. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Assessment of quality application of fire protection means on steel constructions of buildings and structures of various functional purposes. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire safety*. 2015; 3:74-82. (rus).
8. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Zuban A.V. Determination of required thicknesses of an intumescent fire redundant coating on steel structures for given fire resistance limits. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2020; 1:26-29. (rus).
9. Shebeko Yu.N., Zuban A.V., Shebeko A.Yu. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(6):29-34. DOI:10.18322/PVB.2019.28.06.29-34 (rus).
10. Perelmuter A.V. Fire design of steel structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019; 15(1):110-118. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-1-110-118 URL: <https://ijccse.iasv.ru/index.php/ijccse/article/view/195>
11. Molchadskiy I.S. *The fire in a room*. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).
12. Amdahl J., Holmas T., Skallerud B. Ultimate strength of structural members with attachments during accidental fires. *International Conference Response of Structures to Extreme Loading. Toronto, Canada*, 2003.
13. Friebe M., Jang B.S., Jim Y. A parametric study on the use of passive fire protection in FPSO topside module. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2014; 6:826-839. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0216
14. Podolski D., Wang Y.-C., Yuan J. Numerical investigation of intumescent ‘coatback’ on unprotected secondary beams. *Applications of Fire Engineering — Proceedings of the International Conference of Applications of Structural Fire Engineering*, ASFE. 2017; 161-170.
15. Necip Onder Akinci, Krishna Parvathaneni, Abhimanyu Kumar, Hyun-Su Kim, Michael Stahl, Xiaowei Dai. Advanced fire integrity analysis and PFP optimization methods for petrochemical facilities. *21st Annual international Symposium October, Texas*. 2018.
16. Munoz-Garcia E. Analysis and design challenges and solutions of 3 sided passive fire protection PFP on steel beam desks for offshore installations. *Offshore Technology Conference Asia. 2016*. DOI: 10.4043/26623-MS
17. Imran M., Liew M.S., Nasif M.S., Munoz Garcia E., Danyaro K.U., Niazi M.U. Thermal and mechanical response of partially protected steel I-beams under fire. *MATEC Web of Conference*. 2018; 203:06009. DOI: 10.1051/mateconf/201820306009
18. Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Olesiyuk N.M. Heating of rod steel structures with partial and full fire-protected external surface under fire exposure. *Journal of Civil Protection*. 2020; 4(1):20-31.

19. Pekhotikov A.V. *The fire resistance of bended steel structures : dissertation for Ph.D. in Engineering Science*. Moscow, 2008. 198 p. (rus).
20. Golovanov V.I. *The Forecasting of steel structures fire resistance : dissertation for Advanced Doctor in Engineering Science*. Moscow, 2008; 337. (rus).
21. Wang W., Zhang L. An approach for evaluating fire resistance of steel beams considering creep effect. *Procedia Engineering*. 2017; 210:544-550. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.11.112
22. Ishimov A.S., Baryshnikov M.P., Chukin M.V. On the selection of a mathematical function of the equation of state for a description of rheological properties of steel 20 during hot plastic deformation. *Vestnik of G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2015; 1:43-52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23166465> (rus).

*Поступила 25.11.2020, после доработки 04.02.2021;  
принята к публикации 17.03.2021*

*Received November 25, 2020; Received in revised form February 4, 2021;  
Accepted March 17, 2021*

### Информация об авторах

**ВОРОСИН Анатолий Олегович**, главный инженер, Филиал Линде ГмбХ, г. Самара, Российская Федерация; магистрант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2514-9138; e-mail: vorosin@gmail.com

**ПАРФЕНЕНКО Александр Павлович**, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, заместитель директора Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru

### Information about the authors

**Anatoliy O. VOROSIN**, Chief Engineer, Branch of Linde GmbH, Samara, Russian Federation; Magistrate, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2514-9138; e-mail: vorosin@gmail.com

**Aleksander P. PARFENENKO**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Deputy Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru