

Моделирование огнестойкости стальных конструкций эстакад нефтегазовых месторождений при кустовом расположении скважин

Марина Викторовна Гравит ✉, Эльдар Захирович Мамедов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Российскими стандартами предусматриваются детерминированные показатели требуемой огнестойкости несущих конструкций промышленных объектов. Изменения в СП 4.13130 базируются на американском стандарте API 2218, где предполагается вероятностный подход для определения зон воздействия пожара и требуемых пределов огнестойкости. Однако данный подход не получил распространения на объектах нефтяной промышленности из-за отсутствия методики по определению зон воздействия при горении углеводородов.

Цели и задачи. Согласно обозначенным сценариям, определить фактические пределы огнестойкости стальных конструкций эстакад для получения зависимости огнестойкости конструкций от расстояния до очага пожара. Разработать полевые модели пожара согласно проектной документации; определить зоны, подверженные воздействию критической температуры; определить огнестойкости конструкций при различных режимах пожара.

Методы. Исходными данными являлась проектная документация трех месторождений при кустовом расположении скважин. В работе смоделированы наиболее опасный и вероятный сценарии пожаров пролива для каждого месторождения. Разработаны модели эстакад нефтегазовых сетей в ПК Revit. Распространение ОФП смоделировано методом полевого моделирования пожара в ПК PyroSim.

Результаты. Определены фактические пределы огнестойкости конструкций эстакад трех месторождений; определены размеры зон воздействия пожара, в которых требуется огнезащита конструкций. Огнезащита для обеспечения огнестойкости R60 требуется на расстоянии менее 10,7 м при очаге пожара 305,24 МВт; при очаге 38,6 МВт достижение критической температуры происходит до 3 м.

Выводы. При «реальном» режиме пожара конструкции могут иметь более высокие пределы огнестойкости, чем требуется в нормативных документах. Моделирование и расчет огнестойкости позволяют определить необходимость огнезащиты для каждой зоны воздействия пожара, а не только в радиусе до 12 метров. Научные исследования в данной области позволят разработать новые нормативные документы по определению зон воздействия пожара и пределов огнестойкости для конструкций вне помещений.

Ключевые слова: сооружения нефтегазового комплекса; пожарная безопасность; опасные факторы пожара; предел огнестойкости; стальные конструкции; средства огнезащиты; углеводородный режим пожара; опасные факторы пожара

Для цитирования: Гравит М.В., Мамедов Э.З. Моделирование огнестойкости стальных конструкций эстакад нефтегазовых месторождений при кустовом расположении скважин // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 36–51. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.36-51

✉ Гравит Марина Викторовна, e-mail: marina.gravit@mail.ru

Oil and gas fields at pad wells: modeling of fire resistance of steel trestle structures

Marina V. Gravit ✉, Eldar Z. Mamedov

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Russian standards provide deterministic indicators of the required fire resistance of load-bearing structures of industrial facilities. Changes in CP 4.13130 are based on the American standard API 2218, where a probabilistic approach is assumed for determining fire exposure zones and required fire resistance limits. However, this approach is not used at oil industry facilities due to the lack of a methodology for determining the impact zones for hydrocarbon combustion.

Aims and objectives. The aim of this study is to determine the actual fire resistance limits of steel overpasses executing indicated scenarios in order to obtain the dependence of fire resistance of structures on the distance to the source of fire. Objectives of the study also include developing field fire models according to the design documentation; determination of the zones exposed to critical temperature; identifying the fire resistance of structures under different fire regimes.

Methods. The initial data was the design documentation of three oil fields with cluster arrangement of wells. The most dangerous and probable oil or gas spill fire scenarios were modelled for each field. Models of raised oil and gas pipelines were developed using Revit software. Fire hazard spreading was modelled by the method of field fire simulation using PyroSim.

Results. The study found actual fire resistance limits of pipelines of three fields, along with the sizes of fire impact zones, where fire protection of structures is required. Fire protection to ensure fire resistance R60 is required at less than 10.7 m at a source of fire of 305.24 MW; at 38.6 MW the critical temperature is reached in the radius of as low as 3 m.

Conclusions. In a "real" fire regime, structures may have higher fire resistance limits than required in the regulations. Modelling and calculation of fire resistance allows to determine the need for fire protection for each zone of fire exposure, not only within a radius of up to 12 meters. Scientific research in this area will make it possible to develop new normative documents for determining the fire exposure zones and fire resistance limits of exterior structures.

Keywords: oil and gas complex; structures; fire hazards; fire resistance limit; steel structures; fire protection; hydrocarbon fire regime; fire hazards

For citation: Gravit M.V., Mamedov E.Z. Oil and gas fields at pad wells: modeling of fire resistance of steel trestle structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):36-51. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.36-51 (rus).

✉ Marina Viktorovna Gravit, e-mail: marina.gravit@mail.ru

Введение

Современный нефтяной промысел характеризуется высоким уровнем автоматизации и телемеханизации, позволяющим осуществлять контроль и управление режимами эксплуатации нефтяных скважин, системами сбора и подготовки нефти, газокompрессорными, нефтяными и водонасосными станциями. Тем не менее статистика пожаров в России и мире показывает, что возгорания и пожары на объектах нефтегазового комплекса происходят достаточно часто¹.

Кустовой способ разбуривания месторождений характеризуется тем, что на ограниченной части месторождения оборудуется специальная площадка для размещения группы скважин, нефтегазодобывающего оборудования, служебных и бытовых помещений и т.п. Габариты кустовой площадки определяются количеством скважин и расстоянием между ними. Расстояние между отдельными объектами, возможность проезда пожарной техники, а также правила безопасности производства работ на объектах нефтегазодобывающей промышленности регламентируются № 123-ФЗ², другими нормативными документами, например СП 4.13130.2013³, и в первую очередь СП 231.1311500.2015⁴. Расстояние

между оборудованием кустовой площадки должно отвечать требованиям по пожарной и промышленной безопасности как в процессе строительства скважин и монтажа оборудования, так и при их эксплуатации, обслуживании, ремонте и демонтаже.

Различного рода оборудование, технологические аппараты, насосы располагаются на эстажках и эстакадах, как правило, образуемых сварными элементами стальных конструкций и решетчатыми настилами.

Российские нормативные документы в области пожарной безопасности предполагают детерминированный подход к определению требуемых пределов огнестойкости конструкций. Испытания и расчеты производятся при стандартном (целлюлозном) режиме пожара (рис. 1), а не при углеводородном, как это нормируется в США, Европе [1, 2]. При расчетах сценариев развития пожара в России ориентируются только на вероятность эвакуации людей и индивидуальный пожарный риск, не учитывая сохранность объекта защиты, в том числе строительных конструкций, которые обеспечивают его устойчивость при пожаре. В [3] сравнивались требования, предъявляемые к огнестойкости стальных конструкций на объектах нефтеперерабатывающих производств, согласно российским нормативным документам и американскому стандарту API RP 2218⁵. Выявлены значительные отличия в подходах к определению требуемой огнестойкости. В то время как российские нормы предполагают детерминированный подход к определению огнестойкости конструкций, амери-

¹ Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2022 году. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 27.03.2024).

² Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ.

³ СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям.

⁴ СП 231.1311500.2015. Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности.

⁵ API Recommended Practice 2218 (API 2218). Fire proofing. Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants. 3rd ed. American Petroleum Institute, 2013. 60 p.

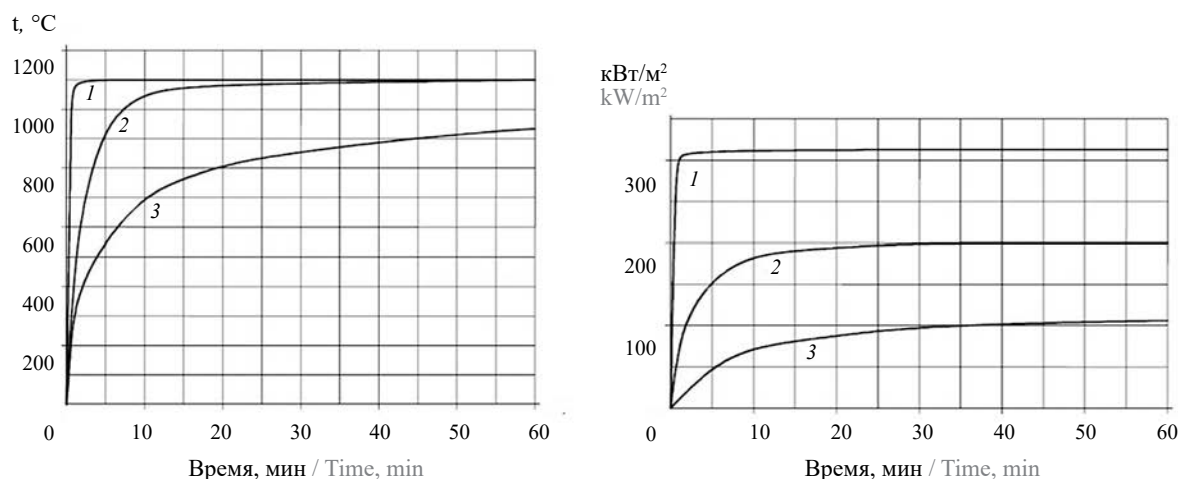


Рис. 1. Графики режимов пожара: 1 — режим Jet-Fire; 2 — углеводородный режим пожара; 3 — стандартный режим пожара
Fig. 1. Graphs of fire modes: 1 — Jet-Fire mode; 2 — hydrocarbon fire mode; 3 — standard fire mode

канский стандарт предлагает риск-ориентированный метод, заключающийся в определении вероятности необходимости применения огнезащиты в каждом месте конструкции.

Основным положением документа API 2218⁴ является определение так называемой «зоны воздействия пожара», в пределах которой необходима огнезащита строительных конструкций. Аналогичный принцип реализован в британском руководстве BSI BS PD 7974-7-2019⁶. Зона воздействия пожара представляет собой пространство, в которое могут при аварийной ситуации выйти из оборудования и трубопроводов горючие и сжиженные газы, ЛВЖ или ГЖ, горение которых может привести к существенным повреждениям строительных конструкций, технологического оборудования и трубопроводов [4]. Расположение и размеры зоны воздействия пожара устанавливаются на основе анализа риска или корпоративных стандартов.

Как уже говорилось выше, в России требования пожарной безопасности для нефтяных и газовых месторождений регламентируются положениями № 384-ФЗ⁷, № 123-ФЗ¹ и СП 231.1311500.2015³. Последний документ содержит ссылки на различные нормативные документы пожарной безопасности, а именно к СП 4.13130² и № 384-ФЗ⁶, содержащему требования к этажеркам и эстакадам. В российских нормативных документах отсутствуют требования о необходимости соответствия пределов огнестойкости углеводородным режимам пожара, таким как пожары проливов и факельные горения. Кроме этого, отсутствуют утвержденные методики испытаний огнезащитных материалов в условиях криогенного

воздействия и быстрого роста температуры (например, пожары струйного горения, Jet Fire [5]), обусловленного спецификой производств. Согласно выводам работы [6], внедрение основных положений API 2218⁴ в российские нормативные документы позволит более гибко подойти к определению требуемых пределов огнестойкости конструкций предприятий нефтегазового комплекса.

В последней редакции СП 4.13130² уже введено понятие «зона воздействия пожара», которое и заимствовано из API 2218⁴, где для жидких углеводородов горизонтальный и вертикальный размеры зоны воздействия пожара находятся в диапазоне от 6 до 12 м от возможного источника поступления горючего продукта. Наружные этажерки, на которых располагаются оборудование или трубопроводы, содержащие легковоспламеняющиеся и горючие жидкости и горючие газы, выполняются железобетонными (нижний ярус) или, как правило, стальными. В стальных этажерках первый ярус, включая перекрытие, но на высоту не менее 4 м необходимо защищать от воздействия высокой температуры. Предел огнестойкости защищенных конструкций должен быть не менее R45 (п. 6.5.47 СП 4.13130.2013²). Допускается применять незащищенные стальные конструкции этажерок при оборудовании их стационарными автоматическими установками пожаротушения. Технологические трубопроводы с горючими и сжиженными горючими газами, легковоспламеняющимися и горючими жидкостями, прокладываемые на территории предприятия, должны быть наземными или надземными на опорах и эстакадах из материалов НГ. Предел огнестойкости колонн эстакад на высоту первого яруса должен быть не менее R60 (п. 6.10.4.1 СП 4.13130.2013²).

Пределы огнестойкости несущих конструкций площадок и этажерок, на которых расположены оборудо-

⁶ RD 7974-7:2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Probabilistic risk assessment. 26.06.2003.

⁷ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

дование и аппараты, в которых обращаются сжиженные горючие газы, легко воспламеняющиеся и горючие жидкости, нормируются не менее R 120 на высоту отметки первого яруса, но не менее 12 м. При этом предел огнестойкости перекрытия первого яруса, на котором расположены такое оборудование и аппараты, должен составлять не менее REI 120 (п. 4.5.48 СП 4.13130.2013²).

Современные ПК по моделированию распространения опасных факторов пожара, реализующие полевую модель, в комплексном расчете с ПК по теплопередаче в твердом теле, позволяют рассчитать прогрев среды (полевая модель) и конструкций (модели, реализующие метод конечных элементов), в том числе для цели определения пределов огнестойкости. Получив плотность теплового потока и температуру на стыке сред «воздух – конструкция», возможно использовать данные для расчета прогрева конструкции с учетом нагрузок и усилий, выбрав последние из информационной модели объекта. Например, в [7] рассматривают интеграцию технологий BIM проектирования и расчета воздействия пожара при помощи FDS на примере связки Revit-RugSim. В ходе работы разработан удобный способ обмена информацией между IFC моделью и FDS файлом. В работе [8] показывают большой потенциал инструментов моделирования пожаров для оценки основных последствий среднemasштабных и крупномасштабных пожаров углеводородов. Авторы в [9] получили зависимость между приведенной толщиной конструкции и ее пределом огнестойкости для стандартного и углеводородного режима пожара. Получен переводной коэффициент для незащищенных стальных конструкций, зависящий от приведенной толщины элемента. В работе [10] получен переводной коэффициент достижения критической температуры при стандартном режиме к углеводородному режиму для стальных конструкций с различными видами огнезащиты с учетом как экспериментальных данных, так и методом численного моделирования.

В работе [11] проведен расчет требуемого предела огнестойкости конструкций технологических этажей газоперерабатывающего завода. Использован принцип вероятностного подхода для разработки методики определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций производственных объектов, учитывающей время, требуемое для эвакуации и спасения персонала, а также заданную надежность строительных конструкций. По итогам работы получена зависимость требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций от заданной величины надежности строительных конструкций при пожаре. Авторы работы [12] объясняют механизм возникновения каскадного пожара пролива с фазовым переходом СПГ, вызванного

утечкой из резервуара для хранения при воздействии ветра. Также рассмотрено влияние ветрового воздействия на распространение опасных факторов пожара.

В статье [13] модель пожара используется, чтобы выяснить, каким образом заданные сценарии пожаров пролива, возникающих в результате воспламенения топлива в заранее определенных резервуарах, могут распространяться на соседние резервуары. Делается вывод о необходимости конкретных рекомендаций по минимальному безопасному расстоянию для анализа эксплуатационных характеристик резервуаров для хранения, подверженных воздействию пожара.

Авторы работы [14] также рассматривают зоны влияния аварий на магистральных трубопроводах, разделяя расстояние на радиус гибели людей и радиус травмирования. В [15] получены зависимости изменения теплового потока от расстояния при пожаре резервуара сжиженного газа. В [16] авторы рассмотрели три наиболее правдоподобных сценария пожара из 27 и их моделирование с помощью программного обеспечения FDS и провели анализ эффективности различных огнезащитных материалов на основе максимального теплового потока, получаемого оборудованием. В [17] представлено сравнительное исследование по прогнозированию теплового поведения морской надводной конструкции в условиях локализованного пожара с использованием различных моделей пожара. Тепловой анализ разработан с помощью коммерческого программного обеспечения конечных элементов. Анализируются три примера локализованного пожара, вызванного горением углеводородов. Также стальные конструкции верхней части типичной морской платформы исследуются в [18], используется также ПО, реализующее МКЭ — ABAQUS. Взрывная нагрузка углеводородов прикладывается в виде избыточного давления на балки и колонны.

Цель настоящей статьи — смоделировать воздействие пожара согласно выбранным сценариям на стальные конструкции эстакад и рассчитать фактические пределы огнестойкости данных конструкций в зависимости от расстояния от очага пожара.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- проанализирована проектная документация трех нефтегазодобывающих месторождений с кустовым расположением скважин;
- из проектной документации объектов выбраны сценарии развития пожара и определены зоны воздействия пожара;
- построены полевые модели пожара с параметрами согласно проектной документации по разработке месторождений;

- определены пределы огнестойкости конструкции эстакад согласно граничным условиям в зонах, подверженных воздействию критических показателей температуры и теплового потока;
- получены зависимости предела огнестойкости конструкции от расстояния от очага пожара.

Материалы и методы

Объектами исследования являются три нефтегазодобывающих месторождения с кустовым расположением скважин, которые связаны между собой нефтегазосборными сетями на эстакадных конструкциях. Пример месторождения с кустовым расположением в виде фото приведен на рис. 2. В статье все месторождения обозначены номерами.

Методы. Расчет распространения опасных факторов, прогрева внешних плоскостей конструкции и распространения пламени проводится в ПО PyroSim. Данное ПО поддерживает импорт модели через формат IFC. Метод выбора сценариев выполнен согласно Приказу МЧС России от 10.07.2009 № 404⁸. В результате анализа исходной документации выбран наиболее опасный сценарий и один из вероятных с развитием пожара факела и пролива.

Для месторождения № 1 рассмотрены 54 сценария, наиболее опасным принят сценарий с разрушением газопровода Ø 530 мм с возникновением факельного горения. Количество опасных веществ определялось с учетом нормативного времени срабатывания запорных устройств, установленных на границах технологических блоков. При этом учитывалось, что не все количество вещества, выбрасываемое или истекающее из аварийного оборудования, может участвовать в создании поражающих факторов или непосредственно наносит ущерб.

Для месторождения № 2 рассмотрены 48 сценариев, сценарий наиболее опасной аварийной ситуации — разрушение нефтегазосборного трубопровода диаметром 325 мм с возникновением вспышки облака ГПВС. Радиус зоны воздействия высокотемпературных продуктов сгорания — 100,3 м.

Для месторождения № 3 рассмотрены 42 сценария, худшим принят сценарий с наиболее вероятной аварийной ситуацией в виде пожара пролива при разгерметизации нефтегазосборного трубопровода.

Построена полевая расчетная модель, длительность моделирования — 300 с (с учетом максимального времени срабатывания запорной арматуры согласно Приказу МЧС России от 10.07.2009 № 404⁷), размеры сетки $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ м.

⁸ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404.



Рис. 2. Пример кустовой площадки на Харасавэйском месторождении (URL: <https://www.gazprom.ru/projects/kharasaveyskoye/>)
Fig. 2. Example of a cluster site at the Kharasaveyskoye field (URL: <https://www.gazprom.ru/projects/kharasaveyskoye/>)

Для фиксации изменения показателей температуры и величины теплового потока на расстояниях 0, 3, 6 и 12 м от очага пожара устанавливаются соответствующие датчики.

При подготовке FDS модели задаются следующие объекты: непроницаемая холодная поверхность земли, поверхность горелки с расходом горючего, соответствующего заданной удельной мощности тепловыделения, открытые границы расчетной области, точки мониторинга лучистого теплового потока, точки мониторинга температуры и вертикальной скорости.

Горючая нагрузка принималась в соответствии с проектной документацией на объекты строительства (табл. 1).

Недостающие параметры задавались исходя из базы данных типовой горючей нагрузки. В PyroSim также необходимо задать постоянную удельную скорость тепловыделения HRRPUA, определяемую по формуле:

$$HRRPUA = H_f \cdot \psi_{уд}, \quad (1)$$

где H_f — низшая рабочая теплота сгорания, кДж/кг; $\psi_{уд}$ — удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с), определяемая по библиотеке реакций и поверхностей горения PyroSim 2023. Для нефти:

$$\psi_{уд} = 0,024 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}.$$

Для расчета предела огнестойкости конструкции при моделируемом пожаре применяется программный комплекс Elcut, реализующий метод конечных элементов. Для задания граничных условий выполнена аппроксимация полученного графика зависимости температуры от времени в моделируемом пожаре в квадратный полином. При этом эквивалентная продолжительность пожара рассчитана в соответствии с [19]. Прогрев конструкции при стандартном и угле-

Таблица 1. Исходные данные для моделирования пожара
Table 1. Initial data for fire modelling

Номер объекта Object number	Наименование вещества Name of the material	Вид горючего Type of fuel	H_f , кДж/кг H_f , kJ/kg	Нормальная скорость распространения пламени, м/с Normal flame Spreading rate, m/s	HRRPUA, кВт/м ² HRRPUA, kW/m ²
1	Метанол Methanol	ЛВЖ Flammable liquid	39 784	0,572	954,8
2	Нефть Oil	ЛВЖ Flammable liquid	46 024	0,35	1104,6
3	Нефть Oil	ЛВЖ Flammable liquid	44 769	0,35	1074,5

Таблица 2. Материалы
Table 2. Materials

Номер объекта Object number	Конструкция Construction	Профиль Cross-section	Сталь Steel	Нагрузка, т Load, t	Длина элемента, м Element's length, m
1	Стойка Column	219 × 8 (ГОСТ 10704–91) ⁹ (GOST 10704–91) ⁹	345-9-09Г2С / 345-9-09G2S (ГОСТ 8509–93) ¹⁰ (GOST 8509–93) ¹⁰	7,15	2,2
	Раскос Diagonal web element	75 × 5 (ГОСТ 10704–91) ⁹ (GOST 10704–91) ⁹	345-9-09Г2С / 345-9-09G2S (ГОСТ 8509–93) ¹⁰ (GOST 8509–93) ¹⁰	1,3	2,4
2	Стойка Column	159 × 6 (ГОСТ 10704–91) ⁹ (GOST 10704–91) ⁹	345-9-09Г2С / 345-9-09G2S (ГОСТ 8509–93) ¹⁰ (GOST 8509–93) ¹⁰	3	1,2
3	Стойка Column	159 × 6 (ГОСТ 10704–91) ⁹ (GOST 10704–91) ⁹	345-9-09Г2С / 345-9-09G2S (ГОСТ 8509–93) ¹⁰ (GOST 8509–93) ¹⁰	0,5	0,5

водородном режиме осуществлялся согласно уравнениям ГОСТ Р ЕН 1363–2–2014¹¹ и задавался как граничные условия 1-го рода.

В ПО STATISTICA построены графики поверхностей с временем, расстоянием и температурой в качестве осей X , Y и Z .

Материалы. Рассматриваемые эстакадные сооружения выполнены из стали. Профили проката и действующая на несущие стальные конструкции нагрузка приведена в табл. 2 и извлечена из разделов проектной документации на месторождения.

Результаты и их обсуждение

Месторождение № 1

Для месторождения № 1 в части обеспечения пожарной безопасности требовалась разработка СТУ в связи с сокращением расстояний между скважинами при отступлении от требований нормативных документов, а также в связи с превышением количе-

ства скважин на кустовой площадке. Наиболее опасным сценарием являлась разгерметизация участка трубопровода с образованием дефектного отверстия характерного размера. Частота разгерметизации участков проектируемого трубопровода определена с учетом образования различных видов разгерметизации и внутреннего диаметра трубопровода.

Сценарий пожара пролива, характеризующийся максимальной зоной распространения поражающих факторов — сценарий 1.1 с площадью пролива 376,1 м². Сценарием с наиболее вероятной аварийной ситуацией, согласно проектной документации, является сценарий 1.2 с площадью пролива 46,9 м². Характеристики сценариев приведены в табл. 3.

Согласно СТО Газпром 2-2.3-400–2009¹², п. 9.2.2.6 «с целью снижения повышенной трудоемкости проведения расчетов, связанных с нестационарностью процесса истечения газа и, следовательно, изменением во времени размеров пламени и теплового потока, рекомендуется расчеты теплового потока проводить для постоянного значения интенсивности истечения, соответствующего рекомендуемому моменту времени

⁹ ГОСТ 10704–91. Трубы стальные электросварные прямошовные.

¹⁰ ГОСТ 8509–93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные.

¹¹ ГОСТ Р ЕН 1363–2–2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы.

¹² СТО Газпром 2-2.3-400–2009. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром».

Таблица 3. Сценарии для месторождения № 1
Table 3. Scenarios for field No. 1

Номер сценария Scenario number	Последствия Effects	Основной поражающий фактор The main damaging factor	Количество опасного вещества, участвующего в аварии, т The amount of dangerous substance involved in the accident, t	Количество опасного вещества, участвующего в создании ОФП, т The amount of dangerous substance involved in the creation of fire hazards, t	Зоны действия теплового потока Zones of effect of the heat flow
1.1	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	15,213	15,213	10,5 кВт/м ² — 30,9 м; 1,4 кВт/м ² — 55,8 м 10.5 kW/sq. m — 30.9 m; 1.4 kW/sq. m — 55.8 m
1.2	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	1,896	1,896	10,5 кВт/м ² — 12,8 м; 1,4 кВт/м ² — 21,8 м 10.5 kW/sq. m — 12.8 m; 1.4 kW/sq. m — 21.8 m

(отсчет времени — от момента разрыва газопровода), зависящему от диаметра газопровода».

В результате анализа исходной документации выбран наиболее опасный сценарий и построена полевая расчетная модель с учетом конструктивного решения. На рис. 3 представлен фрагмент генплана с зонами действия поражающих факторов с интен-

сивностью 10 и 100 кВт/м². Наиболее подвержены тепловому потоку продольные балки и сам трубопровод, на поверхности которых плотность теплового потока может достигать 180 кВт/м² (рис. 4). В представленном сценарии воздействию теплового излучения помимо самой конструкции эстакады газосборной и метаноопроводной сети подверга-

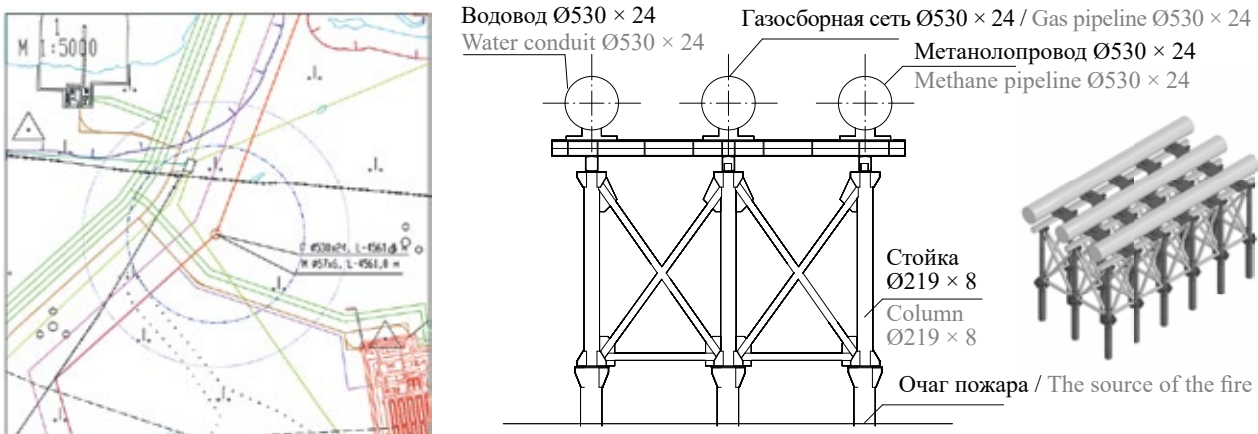


Рис. 3. Зоны действия теплового потока для сценария 1.1 и схема эстакады в ПО Revit
Fig. 3. Heat flow zones for scenario 1.1 and the scheme of the pipe racks in Revit software

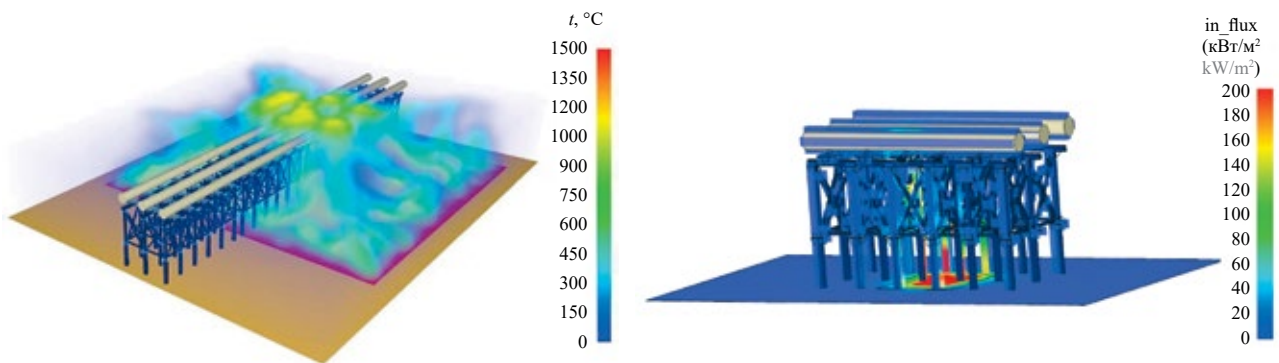


Рис. 4. Распространение опасных факторов пожара в модели (температура, тепловой поток)
Fig. 4. Distribution of fire hazards in the model (temperature, heat flux)

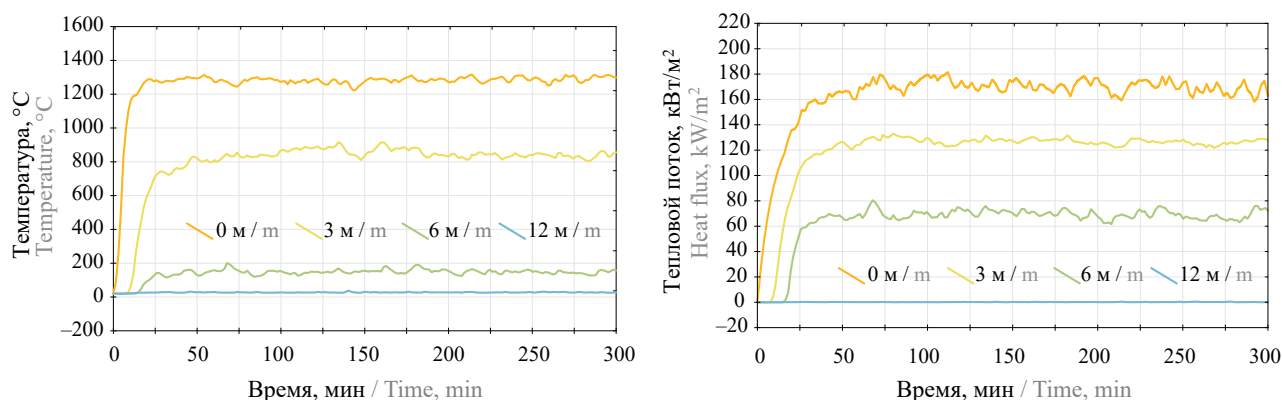


Рис. 5. Графики зависимости температуры и теплового потока от времени
Fig. 5. Dependence of temperature and heat flow on time

ются также проектируемая линия электропередач 10 кВт и автомобильная дорога.

На рис. 5 приведены графики зависимости плотности теплового потока и температуры от времени на уровне нижней балки. Для получения точных количественных данных на уровне трубопроводов получен график зависимости плотности теплового потока от времени.

Данный расчет проводится с целью определения значений ОФП на поверхности конструкций для определения пожарозащитных мероприятий.

Расчет критической температуры стальной конструкции произведен в соответствии с проектом СП¹³ (окончательная редакция размещена на портале Росстандарта).

Расчет температурного коэффициента снижения прочности стали с учетом устойчивости элементов сплошного сечения при центральном сжатии силой N следует выполнять по формуле:

$$\gamma_T = \frac{N}{\varphi_y A R_{yn}},$$

где A — площадь сечения брутто;

φ_y — коэффициент устойчивости при центральном сжатии, значение которого при $\bar{\lambda} \geq 0,6$ следует определять по п. 7.1.3 СП 16.13330¹⁴, где $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_{yn} / E}$ — условная гибкость стержня. Гибкость стержня определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i},$$

где μ — коэффициент приведения длины, зависящий от условий закрепления стержня;

l — длина стержня;

i — радиус инерции сечения;

¹³ СП «Конструкции стальные строительные. Правила обеспечения огнестойкости».

¹⁴ СП 16.13330.2017. СНиП II-23-81* Стальные конструкции.

$$\lambda = \frac{1 \cdot 2,2}{0,074653} = 29,5;$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{R_{yn}}{E}} = 29,5 \sqrt{\frac{345\,000}{206\,010\,000}} = 1,2;$$

$$\varphi_y = \frac{0,5 \left(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}^2} \right)}{\bar{\lambda}^2};$$

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}) + \bar{\lambda}^2,$$

где α, β — коэффициенты, определяемые в зависимости от типов сечений.

$$\alpha = 0,03, \beta = 0,06;$$

$$\delta = 9,87(1 - 0,03 + 0,06 \cdot 1,2) + 1,2^2 = 11,74;$$

$$\varphi_y = \frac{0,5 \left(11,74 - \sqrt{11,74^2 - 39,48 \cdot 1,2^2} \right)}{1,2^2} = 0,96;$$

$$\gamma_T = \frac{71\,500}{0,96 \cdot 0,02121 \cdot 34\,500\,000} = 0,1017,$$

где $\delta_{пр}$ — приведенная толщина металла стальной конструкции, мм.

Критическая температура нагрева сечения, °С, при центральном растяжении или сжатии элемента по потере несущей способности определяется по величине коэффициента γ_T по табл. Б1 проекта СП¹³ и составила $T_{кр} = 695$ °С.

Для стальных конструкций без огнезащиты время прогрева определяется с использованием графиков (номограмм) прогрева стальных конструкций различной приведенной толщины или расчетным методом.

При $\delta = 3,92$ мм критическая температура прогрева балки при воздействии пожара $T_{кр} = 695$ °С будет достигнута в момент времени воздействия пожара, равный:

$$t = t_{fs} = R16.$$

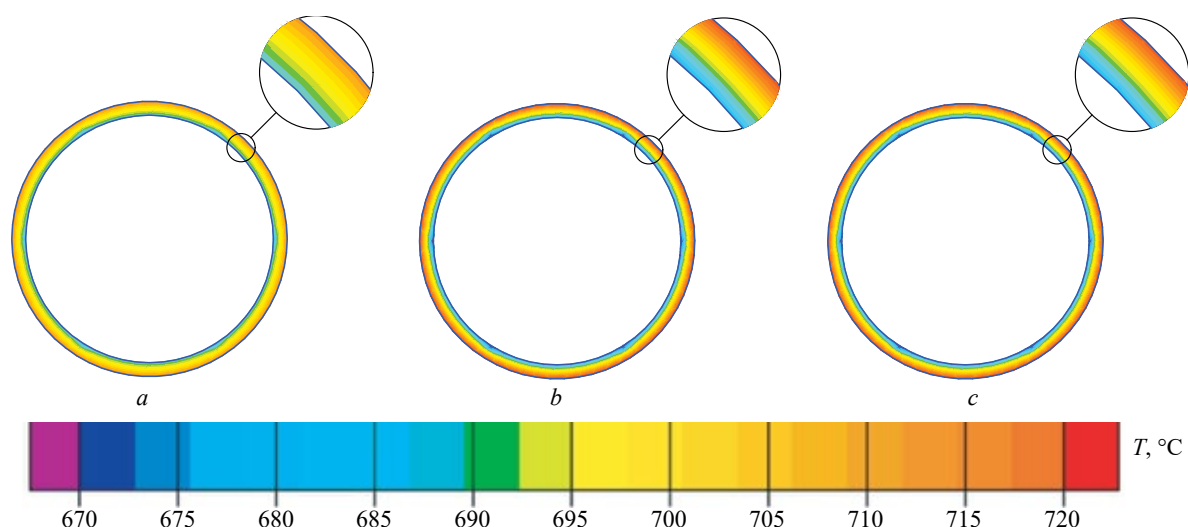


Рис. 6. Распределение температуры по сечению стойки: *a* — при стандартном температурном режиме 15 мин; *b* — при углеводородном режиме 4,5 мин; *c* — при моделируемом пожаре 2 мин

Fig. 6. Temperature distribution over the cross section of the rack: *a* — at cellulosic fire 15 min; *b* — at hydrocarbon fire 4.5 min; *c* — at modelling fire 2.5 min

Таблица 4. Пределы огнестойкости конструкции

Table 4. Fire resistance limits of the structure

Конструкция Construction	$T_{кр}, ^\circ\text{C}$ $T_{cr}, ^\circ\text{C}$	Требуемый предел огнестойкости $R_{тр}$, мин Required fire resistance limit R_r , min	Предел огнестойко- сти при стандартном режиме пожара R_s , мин The fire resistance limit in the standard fire mode is R_s , min	Предел огнестойкости при углеводородном режиме пожара R_H , мин Fire resistance limit in hydrocarbon fire mode R_H , min	Фактический предел огнестойкости $R_{ф}$, мин The actual fire resistance limit R_F , min
Стойка Column	695	60	16	4,5	2,8

Однако в СП¹³ представлена номограмма прогрева конструкций при стандартном режиме пожара.

В работе [9] найдено приближенное соотношение между температурами конструкций при воздействии стандартного и углеводородного пожаров:

$$t_h = 0,28t_s;$$

$$t = 0,28t_s = R4,5.$$

Распределения температуры по сечению стойки при разных режимах пожара приведены на рис. 6.

Полученные пределы огнестойкости сведены в табл. 4.

Месторождение № 2

Сценарий наиболее опасной аварийной ситуации (рис. 7) — разрушение нефтегазосборного трубопро-

Таблица 5. Сценарии для месторождения № 2

Table 5. Scenarios for field No. 2

Номер сценария Scenario number	Последствия Effects	Основной поражающий фактор The main damaging factor	Количество опасного вещества, участвующего в аварии, т The amount of dangerous substance involved in the accident, t	Количество опасного вещества, участвующего в создании ОФП, т The amount of dangerous substance involved in the creation of fire hazards, t	Зоны действия теплового потока Zones of effect of the heat flow
2.1	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	11,548	11,548	10,5 кВт/м ² — 21,1 м, 1,4 кВт/м ² — 39,2 м 10.5 kW/sq. m — 21.1 m, 1.4 kW/sq. m — 39.2 m
2.2	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	6,904	6,904	10,5 кВт/м ² — 18,3 м, 1,4 кВт/м ² — 33,9 м 10.5 kW/sq. m — 18.3 m, 1.4 kW/sq. m — 33.9 m

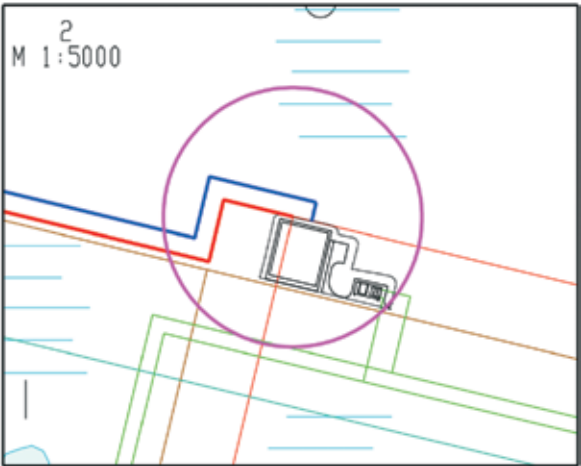
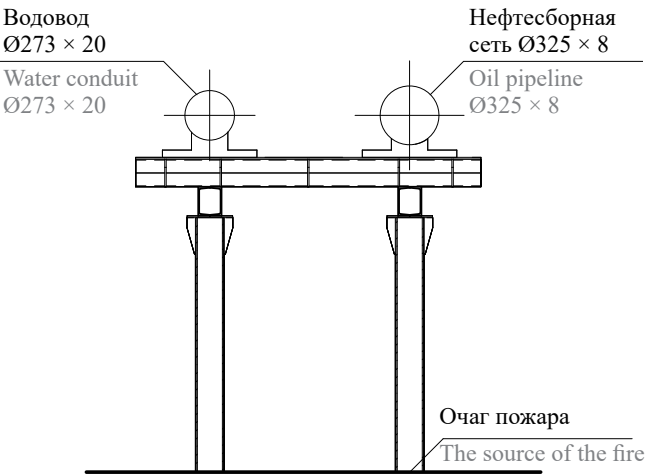


Рис. 7. Сценарий 2.1
Fig. 7. Scenario 2.1



вода диаметром 325 мм с возникновением вспышки облака ГПВС. Радиус зоны воздействия высокотемпературных продуктов сгорания — 100,3 м. Сценарий пожара пролива 2.1 имеет площадь разлива 67,4 м².

Сценарий наиболее вероятной аварийной ситуации — выброс опасного вещества при разгерметизации нефтегазоборного трубопровода диаметром 219 мм. Сценарий пожара пролива 2.2 имеет площадь разлива 40,3 м². Характеристики сценариев приведены в табл. 5.

$$\gamma_T = \frac{30\,000}{0,87 \cdot 0,0115 \cdot 34\,500\,000} = 0,09.$$

Критическая температура нагрева сечения составила $T_{кр} = 700\,^{\circ}\text{C}$.

Модель эстакады в Revit и PyroSim приведена на рис. 8.

При $\delta = 2,94\text{ мм}$ критическая температура прогрева балки при воздействии пожара $T_{кр} = 700^{\circ}$ будет достигнута в момент времени воздействия пожара, равный:

$$t = t_{fs} = R15;$$

$$t_h = 0,28t_s;$$

$$t = 0,28t_s = R4,2.$$

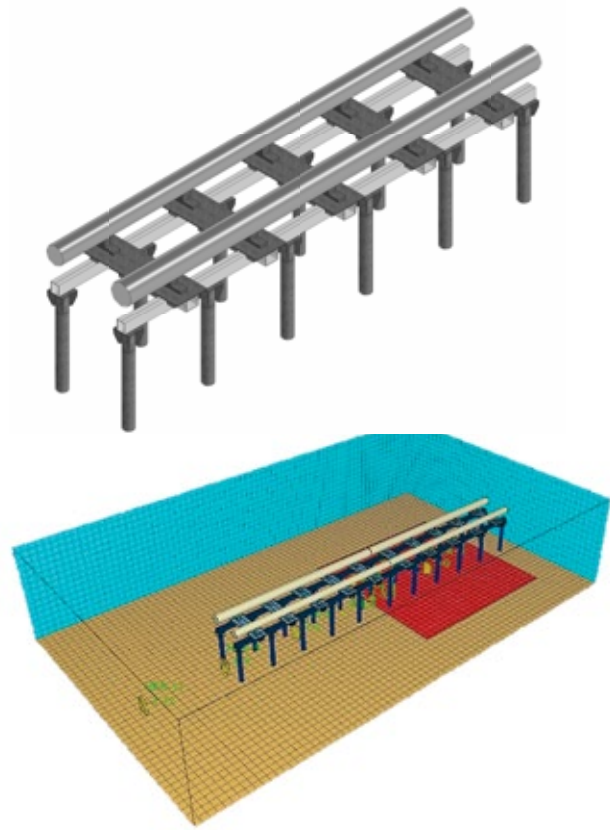


Рис. 8. Результаты моделирования в Revit и PyroSim
Fig. 8. Simulation results in Revit and PyroSim

Таблица 6. Предел огнестойкости конструкции
Table 6. Fire resistance limit of the structure

Номер Number	Конструкция Construction	$T_{кр},\,^{\circ}\text{C}$ $T_{cr},\,^{\circ}\text{C}$	Требуемый предел огнестойкости $R_{тр}$, мин Required fire resistance limit R_r , min	Предел огнестой- кости при стан- дартном режиме пожара R_s , мин The fire resistance limit in the standard fire mode is R_s , min	Предел огнестойкости при углеводородном режиме пожара R_H , мин Fire resistance limit in hydrocarbon fire mode R_H , min	Фактический пре- дел огнестойкости $R_{ф}$, мин The actual fire resistance limit R_F , min
1	Стойка Column	700	60	15	4,2	2,5

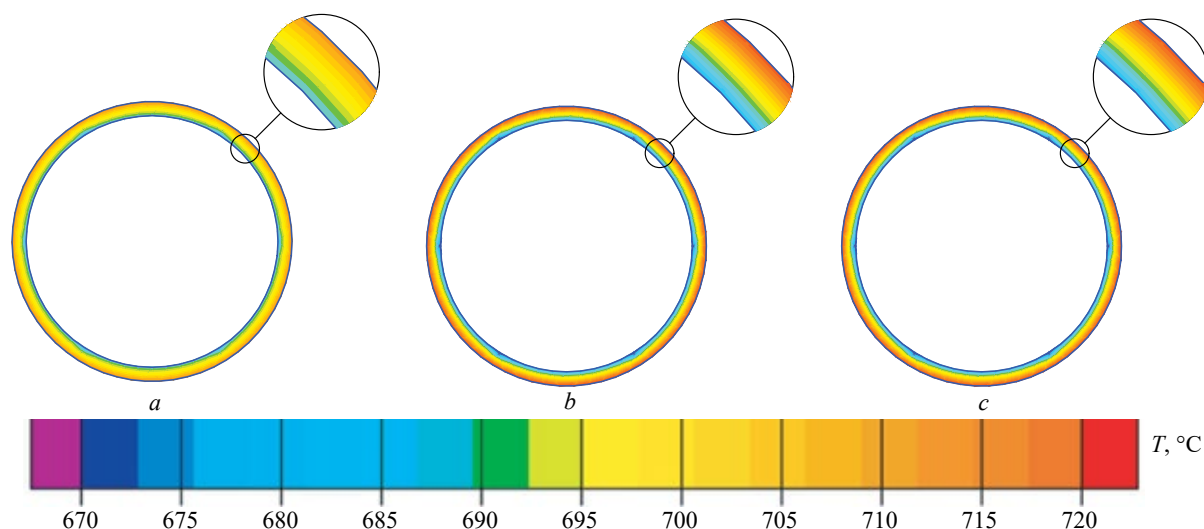


Рис. 9. Распределение температуры по сечению стойки: *a* — при стандартном температурном режиме 15 мин; *b* — при углеводородном режиме 4,2 мин; *c* — при моделируемом пожаре 2 мин

Fig. 9. Temperature distribution over the cross section of the rack: *a* — at cellulosic fire 15 min; *b* — at hydrocarbon fire 4.2 min; *c* — at modelling fire 2.5 min

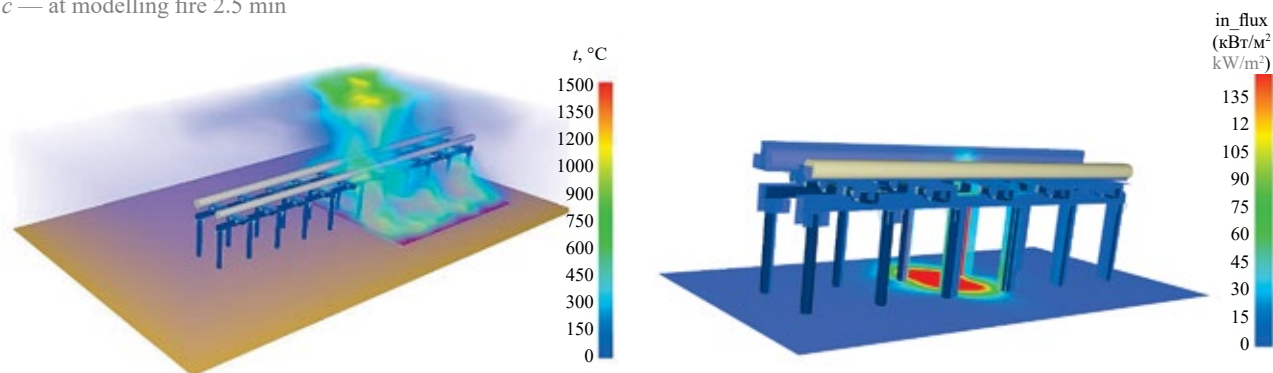


Рис. 10. Значение распределения температуры и плотности теплового потока на поверхности конструкций

Fig. 10. Distribution of temperature and heat flux density on the surface of structures

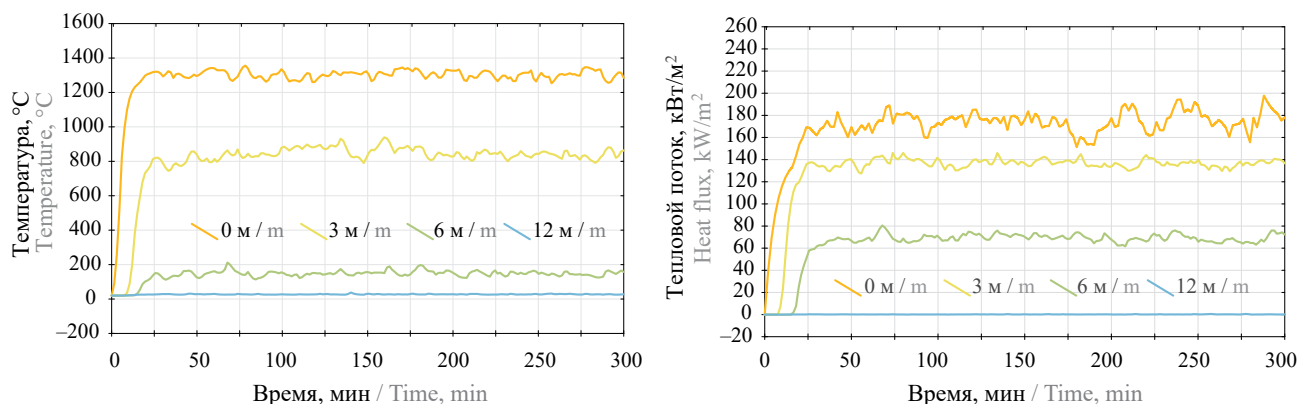


Рис. 11. Графики зависимости теплового потока и температуры от времени

Fig. 11. Dependence of heat flow and temperature on time

Распределения температуры по сечению стойки при разных режимах пожара приведены на рис. 9.

Полученные пределы огнестойкости сведены в табл. 6.

Полученные в Pygosim модели распределения температуры и плотности теплового потока на поверхности конструкций приведены на рис. 10.

Результаты измерений в виде графиков зависимости плотности теплового потока и температуры от времени представлены на рис. 11.

Месторождение № 3

Для нефтегазоконденсатного месторождения № 3 рассматривались определенные кусты скважин, СТУ



Рис. 12. Нефтепровод месторождения № 3
Fig. 12. Oil pipeline of field No. 3

Таблица 7. Сценарии для месторождения № 3
Table 7. Scenarios for field No. 3

Номер сценария Scenario number	Последствия Effects	Основной поражающий фактор The main damaging factor	Количество опасного вещества, участвующего в аварии, т The amount of dangerous substance involved in the accident, t	Количество опасного вещества, участвующего в создании ОФП, т The amount of dangerous substance involved in the creation of fire hazards, t	Зоны действия теплового потока Zones of effect of the heat flow
3.1	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	16,80	16,80	10,5 кВт/м ² — 7,57 м, 1,4 кВт/м ² — 29,05 м 10.5 kW/sq. m — 7.57 m, 1.4 kW/sq. m — 29.05 m
3.2	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	23,92	23,92	10,5 кВт/м ² — 6,87 м, 1,4 кВт/м ² — 32,76 м 10.5 kW/sq. m — 6.87 m, 1.4 kW/sq. m — 32.76 m

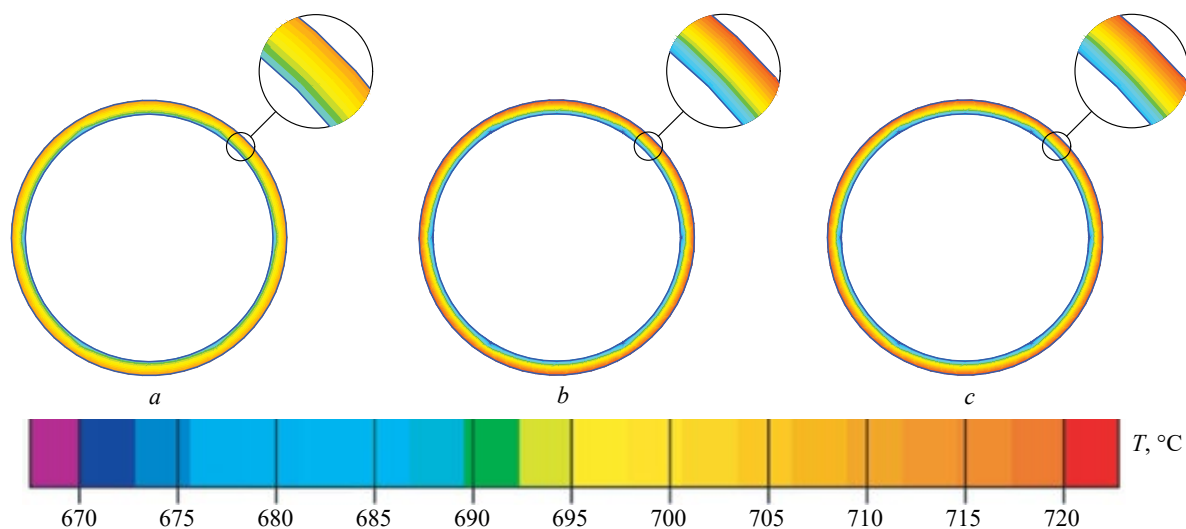


Рис. 13. Распределение температуры по сечению стойки: *a* — при стандартном температурном режиме 15 мин; *b* — при углеводородном режиме 3 мин; *c* — при моделируемом пожаре 2 мин
Fig. 13. Temperature distribution over the cross section of the rack: *a* — at cellulosic fire 15 min; *b* — at hydrocarbon fire 4.2 min; *c* — at modelling fire 2.5 min

Таблица 8. Предел огнестойкости конструкции
Table 8. Fire resistance limit of the structure

Конструкция Construction	$T_{кр}, ^\circ\text{C}$ $T_{cr}, ^\circ\text{C}$	Требуемый предел огнестойкости $R_{тр}$, мин Required fire resistance limit R_r , min	Предел огнестойко- сти при стандартном режиме пожара R_s , мин The fire resistance limit in the standard fire mode is R_s , min	Предел огнестойкости при углеводородном режиме пожара R_H , мин Fire resistance limit in hydrocarbon fire mode R_H , min	Фактический предел огнестойкости R_f , мин The actual fire resistance limit R_f , min
Стойка Column	700	60	15	4,2	2,5

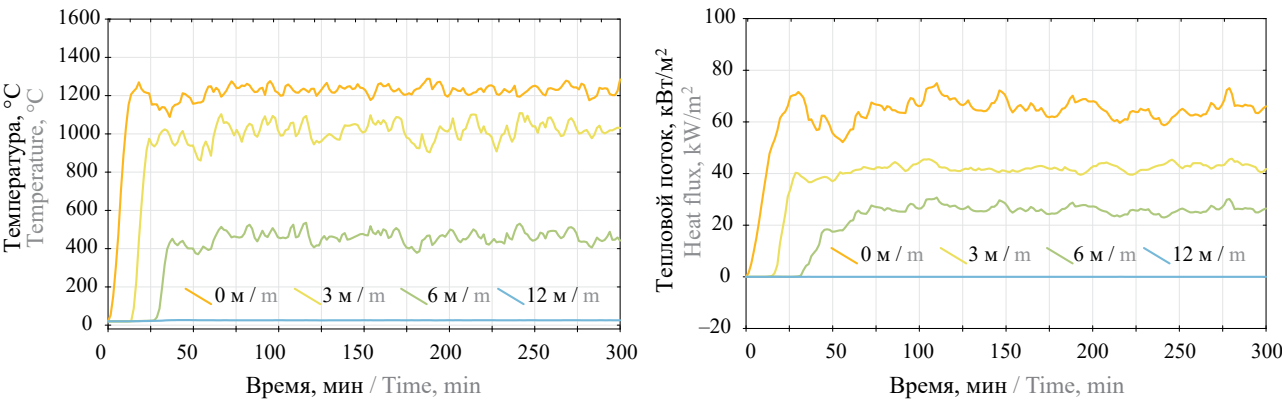


Рис. 14. Зависимости теплового потока и температуры от времени
Fig. 14. Dependences of heat flow and temperature on time

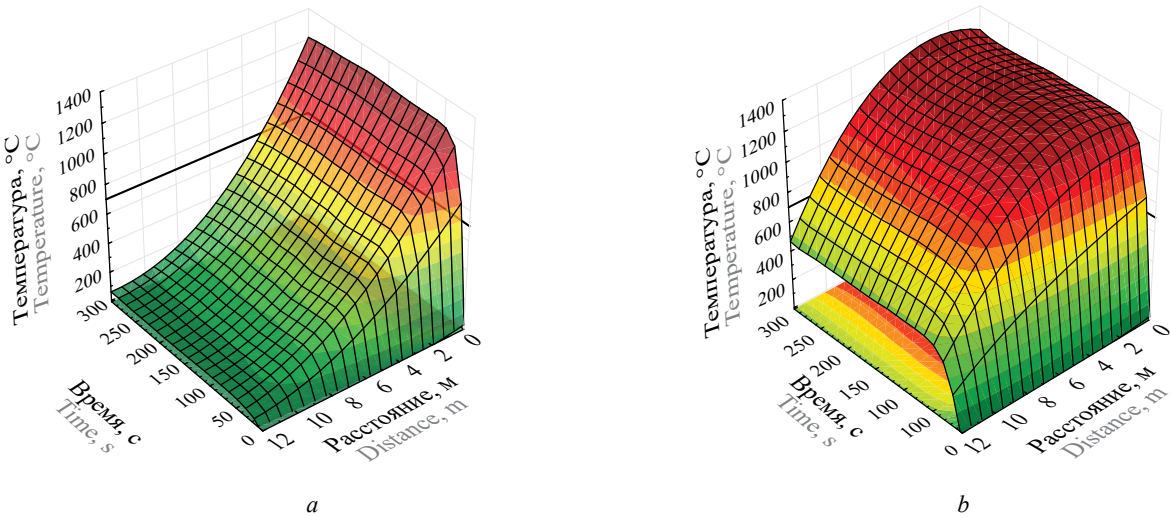


Рис. 15. Графики распределения температуры от времени и расстояния от очага пожара для: *a* — самого вероятного сценария № 2.2 (43,18 МВт); *b* — самого опасного сценария № 1.1 (305,24 МВт)
Fig. 15. Temperature distribution from time and distance from the fire source for: *a* — the most likely scenario — No. 2.2 (43.18 MW); *b* — the most dangerous scenario — No. 1.1 (305.24 MW)

не разрабатывалось. Модель трубопровода в Revit приведена на рис. 12.

Сценарий с наиболее вероятной аварийной ситуацией является 3.1 (табл. 7), пожар пролива при разгерметизации нефтегазосборного трубопровода при переходе через водную преграду в точке максимального разлива. Площадь испарения НГЖС с поверхности земли при сценарии 3.1 — 91,32 м². Сценарий наиболее опасной аварийной ситуации — 3.2 с площадью пролива 129,15 м².

Распределения температуры по сечению стойки при разных режимах пожара приведены на рис. 13.

Полученные пределы огнестойкости сведены в табл. 8.

Результаты измерений в виде графиков зависимости плотности теплового потока и температуры от времени представлены на рис. 14.

Итоговые графики распределения температуры от времени и расстояния от очага пожара для самого

вероятного сценария и самого опасного сценария приведены на рис. 15.

Серая область на рис. 15 показывает критическую температуру стальной конструкции и ее достижение в зависимости от расстояния от очага пожара.

Горизонтальный и вертикальный размер зоны воздействия пожара принимается равным (API 2218): 12 м для горючих сжиженных газов и ЛВЖ; 9 м для горючих жидкостей, нагретых выше температуры вспышки или температуры самовоспламенения (в зависимости от того, какая температура ниже) и 6 м для остальных горючих жидкостей.

Согласно табл. 9 и рис. 13, 14, огнезащита конструкций эстакад для обеспечения огнестойкости R60 требуется на расстоянии не более 10,7 м при очаге пожара 305,24 МВт; при очаге 38,6 МВт достижение критической температуры достигается до 3 м включительно. Размеры зоны воздействия пожаров следует рассчитывать согласно сценариям развития пожара и соответствующей горючей нагрузке в виду того, что значения, приводимые в норме API 2218, не всегда коррелируют с зонами, полученными в моделях пожаров.

Выводы

По окончании работы получены следующие результаты:

1. На основе анализа научно-технической литературы выявлено, что вероятностный подход является перспективным методом, позволяющим оптимизировать проектирование огнезащиты стальных конструкций в зависимости от определяемого фактического предела огнестойкости.

2. Разработаны модели пожара розлива нефти на технологических этажерках объектов нефтегазовой отрасли. Согласно проектной документации на объекты, определены зоны воздействия пожара и рассчитаны пределы огнестойкости стальных конструкций при «реальном», стандартном и углеводородном режиме пожара. Показано, что для объектов нефтегазовой промышленности не следует применять стандартный (целлюлозный) режим пожара, так как огнестойкость конструкций при таком подходе завышается в 5 раз.

3. Использование методики для расчета огнестойкости конструкций в действующих нормативных документах безотносительно к виду проектной аварии, во время ликвидации которой сооружение не должно потерять устойчивость, может привести к ошибочным результатам. Вследствие этого при проектировании сооружений эстакад, этажерок и наружных установок со взрывоопасным оборудованием следует четко определять вид максимальной проектной аварии.

4. Определение мест расположения зон воздействия пожара должно осуществляться в проекте, но методика определения зон воздействия пожара в настоящее время отсутствует, так же как и методика определения фактических пределов огнестойкости для конструкций вне помещений. Представляется целесообразным для каждого защищаемого технологического участка согласно определяемой зоны воздействия пожара проводить расчеты с использованием программных продуктов, реализующих полевою модель с возможностью расчета в окружающей среде.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хасанов И.Р., Гравит М.В., Косачев А.А., Пехотилов А.В., Павлов В.В. Гармонизация европейских и российских нормативных документов, устанавливающих общие требования к методам испытаний на огнестойкость строительных конструкций и применению температурных режимов, учитывающих реальные условия пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 3. С. 49–57. EDN SFOCF.
2. Абрамов И.В., Гравит М.В., Гумерова Э.И. Повышение пределов огнестойкости судовых и строительных конструкций при углеводородном температурном режиме // Газовая промышленность. 2018. № 5. С. 106–115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-predelov-ognestoykosti-sudovyh-i-stroitelnyh-konstruktsiy-pri-uglevodorodnom-temperaturnom-rezhime> (дата обращения: 27.03.2024).
3. Клементьев Б.А., Калач А.В., Гравит М.В. Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 5–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22 URL: [ravnitelnyy-analiz-trebovaniy-rossii-i-ssha-k-ognestoykosti-stroitelnyh-konstruktsiy-neftepererabatyvayuschih-i-neftehimicheskikh](https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22) (дата обращения: 27.03.2024).
4. Dehkordi M.K., Behnam B., Pirbalouti R.G. Probabilistic fire risk analysis of process pipelines // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. Vol. 80. P. 104907. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104907
5. Kashi E., Bahoosh M. Jet fire assessment in complex environments using computational fluid dynamics // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2020. Vol. 37. Issue 1. Pp. 203–212. DOI: 10.1007/s43153-019-00003-y

6. Шебеко А.Ю. Оценка требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций этажек и эстакад предприятий нефтегазовой отрасли // Пожарная безопасность. 2019. № 1. С. 103–107. EDN YZZZML.
7. Shi J., Dao J., Jiang L., Pan Z. Research on IFC- and FDS-based information sharing for building fire safety analysis // *Advances in Civil Engineering*, 2019. Vol. 2019. Issue 1. DOI: 10.1155/2019/3604369
8. Rengel B., Mata C., Pastor E., Casal J., Planas E. A priori validation of CFD modelling of hydrocarbon pool fires // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018. Vol. 56. Pp. 18–31. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.08.002
9. Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // *Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 28. № 6. С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
10. Gravit M., Dmitriev I., Shcheglov N., Radaev A. Oil and gas structures: forecasting the fire resistance of steel structures with fire protection under hydrocarbon fire conditions // *Fire*. 2024. Vol. 7. P. 173. DOI: 10.3390/fire7060173
11. Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Зубань А.В. Расчет требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций технологических этажек предприятий нефтегазовой отрасли на основе оценки времени, требуемого для эвакуации и спасения персонала при пожаре // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2021. Т. 30. № 5. С. 58–65. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.58-65
12. Li L., Luo J., Wu G., Li X., Ji N., Zhu L. Impact assessment of flammable gas dispersion and fire hazards from LNG Tank Leak // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2021/4769552
13. Santos F.da, Landesmann A. Thermal performance-based analysis of minimum safe distances between fuel storage tanks exposed to fire // *Fire Safety Journal*. 2014. Vol. 69. Pp. 57–68. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.010
14. Tong S.-jiao, Wu Z.-zhi, Wang R.-jun, Wu H. Fire risk study of long-distance oil and gas pipeline based on QRA // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 135. Pp. 368–374. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.144
15. Pio G., Carboni M., Iannaccone T., Cozzani V., Salzano E. Numerical simulation of small-scale pool fires of LNG // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 61. Pp. 82–88. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.06.002
16. Lim J.W., Baalisampang T., Garaniya V., Abbassi R., Khan F., Ji J. Numerical analysis of performances of passive fire protections in processing facilities // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103970. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103970
17. Manco M.R., Vaz M.A., Cyrino J.C.R., Landesmann A. Evaluation of localized pool fire models to predict the thermal field in offshore topside structures // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020. Vol. 42 (12). DOI: 10.1007/s40430-020-02694-8
18. Chandrasekaran S., Pachaiappan S. Numerical analysis and preliminary design of topside of an offshore platform using FGM and X52 steel under special loads // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2020. Vol. 5 (3). DOI: 10.1007/s41062-020-00337-4
19. Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Гордиенко Д.М. Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для строительных конструкций на основе моделирования пожара в помещении // *Пожарная безопасность/ Fire Safety*. 2015. № 1. С. 31–39. EDN TLITON.

REFERENCES

1. Khasanov I.R., Gravit M.V., Kosachev A.A., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Harmonization of European and Russian regulatory documents establishing general requirements for fire-resistance test methods of building constructions and the use of temperature curves that take into account real fire conditions. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(3):49-57. EDN SFOCFF (rus).
2. Abramov I.V., Gravit M.V., Gumerova E.I. Increase in the fire resistance limits of ship and building structures with hydrocarbon fire. *Gas Industry Magazine*. 2018; 5:106-115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-pre-delov-ognestoykosti-sudovyh-i-stroitelnyh-konstruktsiy-pri-uglevodorodnom-temperaturnom-rezhime> (accessed: 27.03.2024). (rus).
3. Klementev B., Kalach A., Gravit M. A comparative analysis of the requirements of Russia and the United States to the fire resistance of building structures of oil refineries and petrochemical plants. *Pozharovzryvbezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):5-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22 URL: [ravnitelnyy-analiz-trebovaniy-rossii-i-ssha-k-ognestoykosti-stroitelnyh-konstruktsiy-neftepererabatyvayushih-i-neftehimicheskikh](https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22) (accessed: 27.03.2024). (rus).
4. Dehkordi M.K., Behnam B., Pirbalouti R.G. Probabilistic fire risk analysis of process pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2022; 80:104907. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104907
5. Kashi E., Bahoosh M. Jet fire assessment in complex environments using computational fluid dynamics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2020; 37(1):203-212. DOI: 10.1007/s43153-019-00003-y
6. Shebeko A.Yu. Estimation of required fire resistance limits of bearing structures of refinery platforms and pipe racks. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2019; 1:103-107. EDN YZZZML (rus).

7. Shi J., Dao J., Jiang L., Pan Z. Research on IFC- and FDS-Based information sharing for building fire safety analysis. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 2019(1). DOI: 10.1155/2019/3604369
8. Rengel B., Mata C., Pastor E., Casal J., Planas E. A priori validation of CFD modelling of hydrocarbon pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 56:18-31. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.08.002
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. Gravit M., Dmitriev I., Sheheglov N., Radaev A. Oil and gas structures: forecasting the fire resistance of steel structures with fire protection under hydrocarbon fire conditions. *Fire*. 2024; 7:173. DOI: 10.3390/fire7060173
11. Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Zuban A.V. The calculation of required fire resistance limits for engineering structures of technological pipe racks at oil and gas processing plants on the basis of an evaluation of the time needed for personnel evacuation and rescue in case of fire. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):58-65. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.58-65 (rus).
12. Li Lifeng, Luo Jinheng, Wu Gang, Li Xinhong, Ji Nan, Zhu Lixia. Impact assessment of flammable gas dispersion and fire hazards from LNG tank leak. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021; 2021:1-15. DOI: 10.1155/2021/4769552
13. Santos F.da, Landesmann A. Thermal performance-based analysis of minimum safe distances between fuel storage tanks exposed to fire. *Fire Safety Journal*. 2014; 69:57-68. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.010
14. Tong S.-jiao, Wu Z.-zhi, Wang R.-jun, Wu H. Fire risk study of long-distance oil and gas pipeline based on QRA. *Procedia Engineering*. 2016; 135:368-374. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.144
15. Pio G., Carboni M., Iannaccone T., Cozzani V., Salzano E. Numerical simulation of small-scale pool fires of LNG. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 61:82-88. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.06.002.
16. Lim J.W., Baalisampang T., Garaniya V., Abbassi R., Khan F., Ji J. Numerical analysis of performances of passive fire protections in processing facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103970. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103970
17. Manco M.R., Vaz M.A., Cyrino J.C.R., Landesmann A. Evaluation of localized pool fire models to predict the thermal field in offshore topside structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020; 42(12). DOI: 10.1007/s40430-020-02694-8
18. Chandrasekaran S., Pachaiappan S. Numerical analysis and preliminary design of topside of an offshore platform using FGM and X52 steel under special loads. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2020; 5(3). DOI: 10.1007/s41062-020-00337-4
19. Shebeko A.Yu. Assessment of equivalent fire duration for building structures based on compartment fire modeling. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2015; 1:31-39. (rus).

Поступила 24.07.2024, после доработки 30.07.2024;

принята к публикации 02.08.2024

Received July 24, 2024; Received in revised form July 30, 2024;

Accepted August 2, 2024

Информация об авторах

ГРАВИТ Марина Викторовна, канд. техн. наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; РИНЦ ID: 667288; ResearcherID: B-4397-2014; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: marina.gravit@mail.ru

МАМЕДОВ Эльдар Захирович, студент Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; ORCID: 0009-0008-4470-2465; e-mail: el.mamedov7578@gmail.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Marina V. GRAVIT, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, litera B, 29 Politeknicheskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 667288; ResearcherID: B-4397-2014; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: marina.gravit@mail.ru

Eldar Z. MAMEDOV, Student of Civil Engineering Institute, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, litera B, 29 Politeknicheskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-4470-2465; e-mail: el.mamedov7578@gmail.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.