

## Влияние ветровой нагрузки на пределы огнестойкости стальных конструкций объектов нефтегазовой промышленности

Марина Викторовна Гравит<sup>1</sup>✉, Эльдар Захирович Мамедов<sup>2</sup>,  
Максим Дмитриевич Антонов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО «Запсибгазпром-Газификация», г. Тюмень, Россия

<sup>3</sup> ООО «Метропроект», г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Аварии на объектах нефтегазового комплекса происходят ежегодно. Современная российская нормативная база предписывает проведение испытаний для определения огнестойкости конструкций при стандартном температурном режиме и не учитывает специфику технологических процессов производственного объекта, а также его расположение и климатические параметры окружающей среды.

**Цели и задачи.** Определить величину ветровой нагрузки для каждого из объектов. На основе разработанных полевых моделей получить расчетные модели пожара, учитывающие действие ветра. Оценить влияние ветра на пределы огнестойкости стальных строительных конструкций объектов нефтегазовой промышленности.

**Методы.** Расчет произведен с применением FDS в ПК Pyrosim на основе информационных моделей объектов, разработанных в ПК Revit. Для определения ветрового воздействия на объекты была применена теория подобия Монина – Обухова.

**Результаты.** По итогам моделирования получены области распространения ОФП для каждого из объектов. Показано, что прирост радиуса зоны влияния пожара составляет от 4,5 до 8,6 м.

**Выводы.** Результаты расчета с учетом ветровой нагрузки демонстрируют значительное расширение зоны влияния пожара. Можно сделать вывод, что игнорирование ветровой нагрузки при определении пределов огнестойкости конструкций или разработке проекта огнезащиты недопустимо, поскольку ветер значительно увеличивает площадь зоны влияния пожара, а следовательно, и объем конструкций, подлежащих огнезащите.

**Ключевые слова:** сооружения нефтегазового комплекса; пожарная безопасность; опасные факторы пожара; моделирование

**Для цитирования:** Гравит М.В., Мамедов Э.З., Антонов М.Д. Влияние ветровой нагрузки на пределы огнестойкости стальных конструкций объектов нефтегазовой промышленности // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 5–15. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.5-15

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

## Influence of wind load on fire resistance limits of steel structures of oil and gas industry facilities

Marina V. Gravit<sup>1</sup>✉, Eldar Z. Mamedov<sup>2</sup>, Maksim D. Antonov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> “Zapsibgazprom-Gazifikatsiya” LLC, Tyumen region, Russian Federation

<sup>3</sup> “Metroproject” LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Accidents at oil and gas facilities occur every year. Current Russian regulations require testing to determine the fire resistance of structures under standard temperature-time curve and do not take into account the specific features of the production facility’s technological processes, its location, or the climatic parameters of the surrounding environment.

**Aims and Purposes.** Assess the impact of wind on the fire resistance limits of steel structures in oil and gas industry facilities. Determine the wind load for each facility. Based on previously created field models, develop fire calculation models that take wind effects into account.

**Methods.** The calculation was performed using FDS in Pyrosim software based on information models of objects developed in Revit software. Monin – Obukhov similarity theory was used to determine the wind impact on objects.

**Results.** Based on the simulation results, the areas of spread of the fire front were determined for each of the objects. It was shown that the increase in the radius of the fire's zone of influence ranges from 4.5 to 8.6 m.

**Conclusions.** The results of the calculation, taking into account wind load, demonstrate a significant expansion of the fire's area of influence. It can be concluded that ignoring wind load when determining the fire resistance limits of structures or developing a fire protection design is unacceptable, since wind significantly increases the area of the fire's impact zone and, consequently, the volume of structures requiring fire protection.

**Keywords:** oil and gas complexes; fire safety; fire hazards; modelling

**For citation:** Gravit M.V., Mamedov E.Z., Antonov M.D. Influence of wind load on fire resistance limits of steel structures of oil and gas industry facilities. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):5-15. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.5-15 (rus).

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

## Введение

Несмотря на высокий уровень автоматизации современной нефтедобывающей отрасли, статистика<sup>1</sup> ежегодно отмечает взрывы и пожары, происходящие на производственных объектах нефтегазодобывающей промышленности. В качестве основных причин данных аварий можно выделить износ производственного оборудования и нарушение технологического производства.

Такие пожары отличаются достижением высоких температур через небольшой промежуток времени после начала [1] и необходимостью использования определенных средств и методов пожаротушения [2]. Поэтому они могут оказывать катастрофическое температурное воздействие на несущие конструкции производственных объектов [3].

Нормативные документы, регламентирующие огнестойкость строительных конструкций, в зависимости от страны, в которой они действуют, предполагают различные температурные режимы при проведении испытаний [4–6]. Так, в российской нормативной базе<sup>2</sup> в процессе испытания конструкций на огнестойкость должен быть создан стандартный температурный режим (1):

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1), \quad (1)$$

где  $T$  — температура в печи, соответствующая времени, °C;

$T_0$  — температура в печи до начала теплового воздействия, °C;

$t$  — время, исчисляемое от начала испытания, мин.

В то же время, например, в США испытания проводятся при углеводородном режиме пожара, который более соответствует пожару пролива и факельному

горению на объекте нефтегазовой промышленности, чем стандартный температурный режим. Кроме этого, в российской нормативной документации не учитывается влияние специфики производственного объекта, и вследствие этого температурного режима, и сценария протекания вероятного пожара (например, струйное горение или «Jet Fire» [7]). В работе [8] авторы утверждают, что введение в отечественную нормативную базу положений зарубежных регламентирующих документов позволит подойти к вопросу определения огнестойкости строительных конструкций нефтегазового комплекса более гибко.

Одним из основных методов оценки пределов огнестойкости стальных несущих конструкций, в том числе объектов нефтегазовой отрасли (этажерок, эстакад, резервуаров и т.п.), применяемых на начальных этапах исследования и не требующих проведения натурных огневых испытаний, является математическое моделирование в различных программных комплексах.

В исследовании [9] авторы рассматривают поведение двутавровой балки под статической нагрузкой различной величины при воздействии температурного режима пожара. Для расчета авторы применяют программный комплекс ANSYS и нейросети. Результаты показали высокое качество полученной модели.

Статья [10] посвящена исследованию поведения стальных балок в условиях реального пожара. В своей работе авторы используют FDS (Fire Dynamics Simulator). Утверждается, что погрешность расчета на основе полученной модели составляет менее 5 %.

В исследовании [11] авторы рассматривают поведение стальных колонн в условиях пожара. В материалах статьи приводится численная методика оценки огнестойкости заземленных стальных колонн. Такая колонна, жестко заземленная в базе и несущая вертикальную нагрузку, склонна к потере устойчивости в условиях пожара. Методика, предложенная авторами, как утверждается, позволяет описывать широкий перечень практических случаев: различное опирание колонны, эксплуатационные нагрузки, а также

<sup>1</sup> Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2023 году // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.2024. URL: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports)

<sup>2</sup> ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

разнообразные параметры температурного воздействия. Ожидается, что методика станет весьма полезным инструментом в оценке огнестойкости несущих конструкций.

Значительное влияние на динамику распространения пожара оказывает ветер. Для объектов, не имеющих сплошного фасада (например, эстакады, этажерки, навесы), характерно значительное горизонтальное смещение зоны влияния горения, вызванное воздействием ветровой нагрузки. Исследования, посвященные анализу влияния ветровой нагрузки на динамику распространения пожара, рассматривают различные сценарии возникновения и распространения пожара. Так, например, в исследовании [12] на основе числового моделирования рассматривается влияние ветра на распространение огня по фасадной системе.

Также ветровая нагрузка оказывает значительное влияние на эффективность систем вентиляции и дымоудаления высотных зданий. В работе [13] авторы утверждают, что ветровая нагрузка оказывает значительное влияние на эффективность систем дымоудаления зданий.

Отдельная категория научных работ посвящена исследованию влияния не только ветровой нагрузки, но и рельефа местности на форму пожара и скорость его распространения. В исследовании [14] авторы утверждают, что среди различных факторов, влияющих на распространение огня, ключевое значение имеют уклон рельефа местности и скорость ветра. Аналогичная тема рассмотрена авторами статьи [15]. В работе [16] рассматривается совместное влияние процентного наклона рельефа и интенсивности пожара на идеализированное здание.

В исследованиях [17, 18] авторы анализируют влияние конфигурации источника огня и скорости ветра на мощность и динамику распространения пожара.

В работе [19] авторы изучают влияние взаимного расположения двух зданий, скорости ветра и его направления на распространение пожара.

Детальное исследование взаимодействия огня и ветра имеет большое значение для понимания причин разрушительных последствий крупных пожаров в ветреную погоду. Несмотря на большое количество научных работ, посвященных анализу огнестойкости конструкций объектов нефтегазового комплекса в целом, вопросы влияния ветра на пределы огнестойкости стальных конструкций каркасных объектов (этажерок, эстакад) освещены слабо.

Целью настоящей работы является оценка влияния ветровой нагрузки на пределы огнестойкости стальных строительных конструкций на объектах нефтегазовой промышленности. Для достижения

поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать проектную документацию рассматриваемых объектов в части географического расположения сооружений, рельефа местности, а также параметров климата;
- определить величину ветровой нагрузки: изменение скорости ветра по высоте объекта;
- построить полевые модели пожара, учитывающие ветровую нагрузку;
- получить величины смещения областей влияния ОФП на рассматриваемых объектах и оценить влияние ветровой нагрузки на достижение пределов огнестойкости стальных несущих конструкций.

## Материалы и методы

В исследовании рассматривались три объекта: эстакада нефтегазосборной сети (объект № 1), этажерка сжижения природного газа (объект № 2) и этажерка узла десорбции (объект № 3) (рис. 1). Расчет распространения опасных факторов пожара и пределов огнестойкости для данных объектов произведен без учета влияния ветровой нагрузки [20, 21].

Моделирование, учитывающее влияние ветровой нагрузки, производилось в ПО Pyrosim. Полевая модель пожара построена на расчетной сетке  $0,2 \times 0,2 \times 0,2$  м и содержит следующие объекты: конструкции объектов; поверхность распространения пожара с заданной удельной мощностью тепловыделения; непроницаемую холодную поверхность земли; открытые границы расчетной области; датчики, фиксирующие значения температуры окружающей среды на удалении от очага пожара. Геометрия самих сооружений (конструкции: колонны, балки, перекрытия и т.д.) импортирована из ПО Revit с применением формата IFC.

Датчики, фиксирующие температуру окружающей среды, установлены в горизонтальной плоскости на расстоянии от 0 до 15 м от очага пожара с шагом 3 м.

Продолжительность расчета составила 300 с. Данное значение принято с учетом положений Методики<sup>3</sup> как расчетное время отключения технологических трубопроводов при ручном управлении.

Для рассматриваемых сценариев смоделированы восемь дополнительных ситуаций, каждая из которых учитывает различное направление ветровой нагрузки по следующей схеме (рис. 2).

Нормативные показатели скорости и направления ветра приняты согласно СП 131.13330<sup>4</sup> с учетом

<sup>3</sup> Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533.

<sup>4</sup> СП 131.13330.2020. СНиП 23-01-99. Строительная климатология.

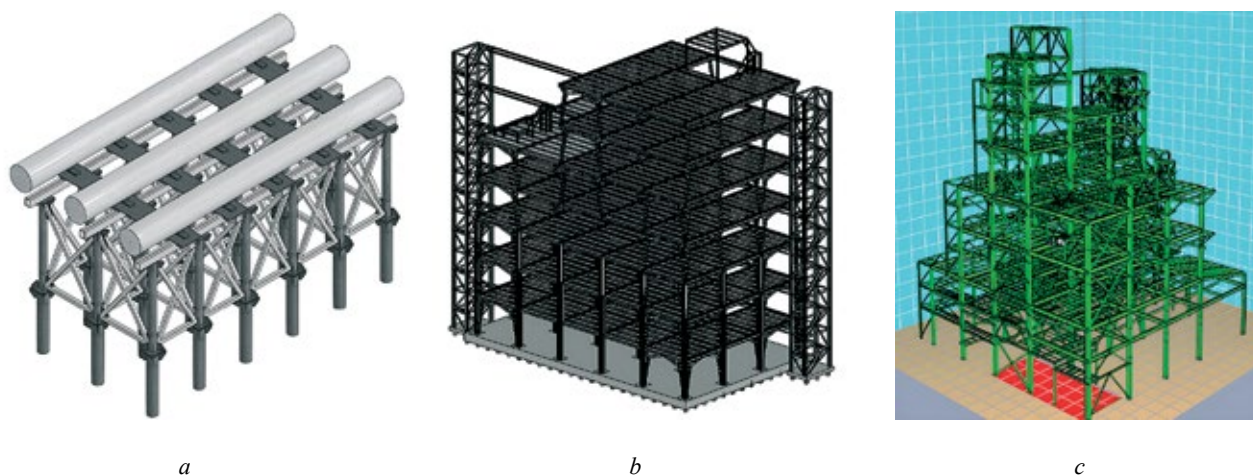


Рис. 1. Общий вид моделей: а — эстакада нефтегазосборной сети; б — этажерка сжижения природного газа; с — этажерка узла десорбции

Fig. 1. General view of models: a — oil and gas gathering rack; b — natural gas liquefaction rack; c — desorption unit rack

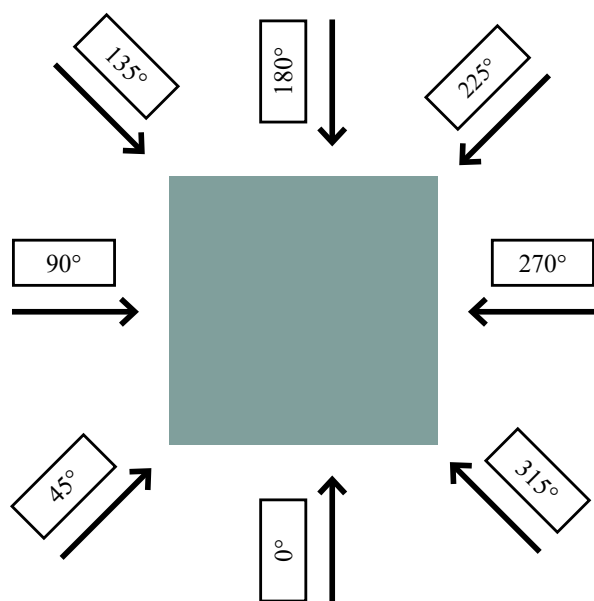


Рис. 2. Рассматриваемые направления ветра для расчета

Fig. 2. Analyzed wind directions for calculation

географического положения рассматриваемых объектов (табл. 1).

При определении параметров ветровой нагрузки для ее задания в Rygosim применялась теория подобия Монина – Обухова [22]. Данная теория рассматривается как самая простая и используется для моделирования профиля скорости ветра на высотах, относящихся к приземному слою воздуха. В соответствии с этой теорией скорость ветра  $v$  на высоте  $z$  определяется по формуле (2):

$$v(z) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln \frac{z}{z_0}, \tag{2}$$

где  $u_*$  — скорость трения;  
 $k$  — постоянная Кармана;  
 $z$  — высота расчета;  
 $z_0$  — параметр шероховатости, принимаемый в зависимости от ландшафта местности. Для открытого ландшафта принимаем  $z_0 = 0,03$ .

Таблица 1. Нормативные показатели ветровой нагрузки

Table 1. Standard wind load indicators

Номер объекта Object number	Преобладающее направление ветра за декабрь – февраль Prevailing wind direction for December – February	Максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, м/с Maximum average wind velocity by compass direction for January, m/s	Средняя скорость ветра, м/с, за период со средней суточной температурой воздуха $\leq 8^\circ\text{C}$ Average wind velocity, m/s, for the period with an average daily air temperature $\leq 8^\circ\text{C}$	Преобладающее направление ветра за июнь – август Prevailing wind direction for June – August	Минимальная из средних скоростей ветра по румбам за июль, м/с Minimum average wind velocity by compass direction for July, m/s
1	ЮЗ SW	7,7	6,2	С N	4,8
2	ЮЗ, З SW, W	3,2	2,4	З W	2,3
3	ЮВ SE	4,1	3,1	С N	0,0

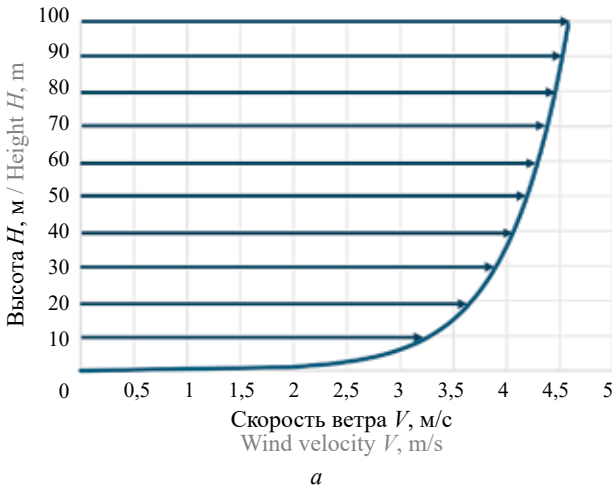
**Таблица 2.** Показатели скорости трения  
**Table 2.** Friction speed indicators

Номер объекта Object number	Показатель аэродинамической шероховатости Aerodynamic roughness index	Принятая скорость ветра, м/с Accepted wind velocity, m/s	Показатель скорости трения Friction coefficient
1	0,03	7,7	0,543
2	0,03	3,2	0,226
3	0,03	4,1	0,289

В свою очередь, скорость трения  $u_*$  определяется из формулы (3):

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (3)$$

где  $\tau_w$  — напряжения сдвига на границе потока;  
 $\rho$  — плотность воздуха.



В то же время при наличии значений скорости ветра на определенной высоте скорость трения можно определить по формуле (4):

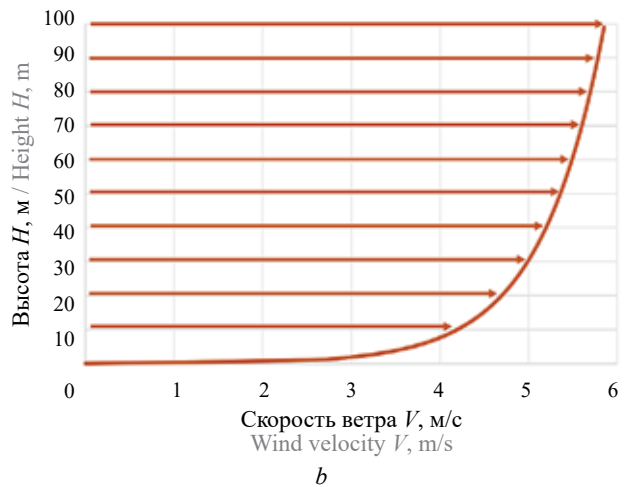
$$u_* = \frac{v(z) \cdot k}{\ln \frac{z}{z_0}}. \quad (4)$$

Показатели скорости трения для объектов приведены в табл. 2.

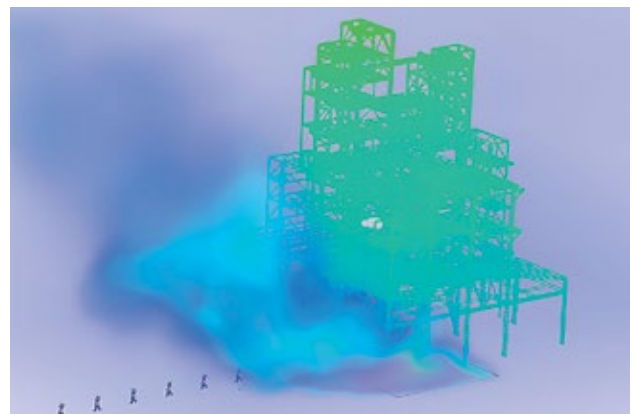
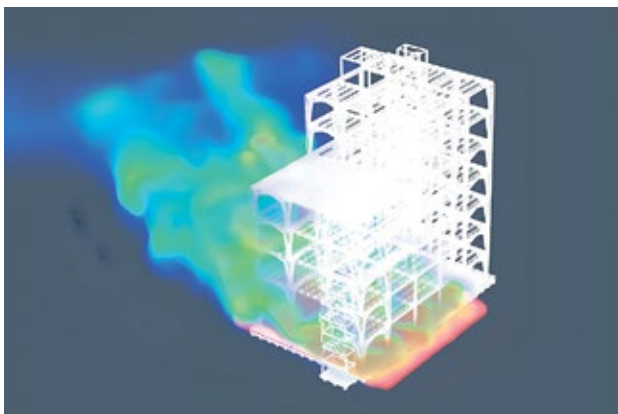
На основании полученных значений по формуле (1) можно определить, как изменяется скорость ветра с увеличением высоты (рис. 3).

### Результаты и их обсуждение

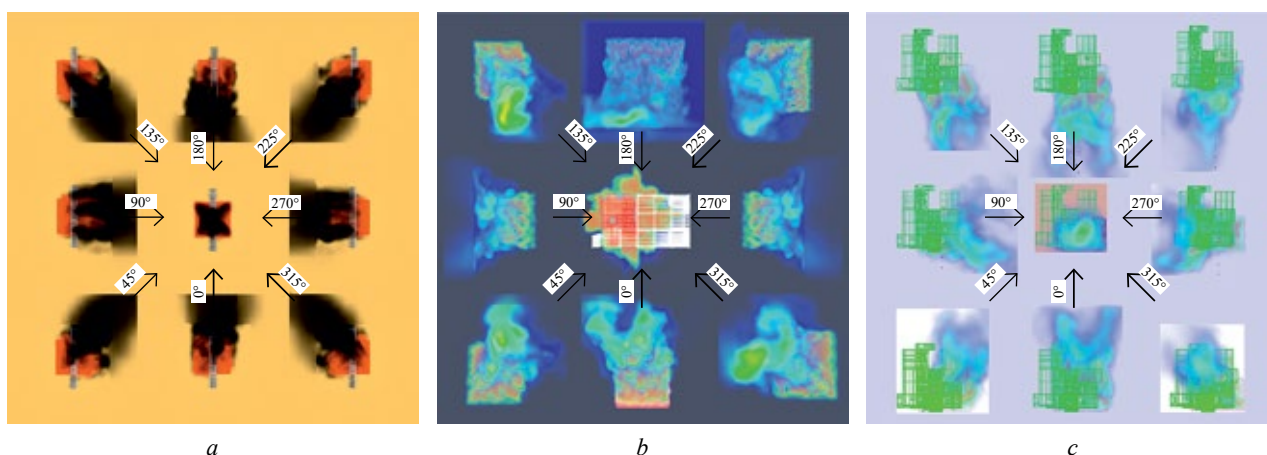
В Pyrosim произведено моделирование распространения ОФП, в результате которого получены визуализации распространения ОФП на объектах, а также графики зависимости температуры окружающей среды от времени. На рис. 4 показан



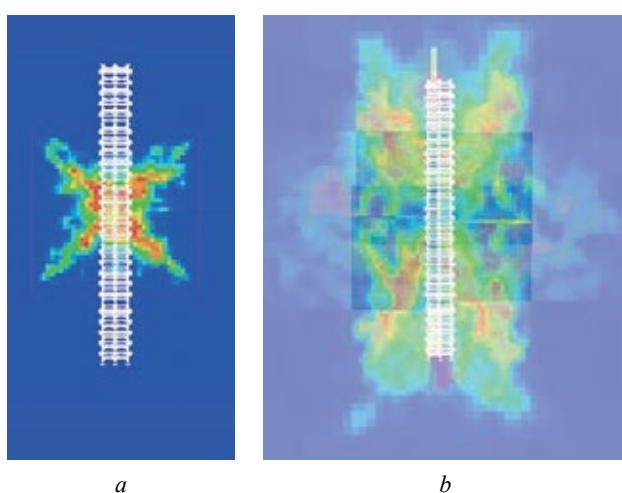
**Рис. 3.** Зависимость скорости ветра от высоты: *a* — для объекта № 2; *b* — для объекта № 3  
**Fig. 3.** Wind velocity dependence on altitude: *a* — for object No. 2; *b* — for object No. 3



**Рис. 4.** Общий вид расчетных моделей и распространения ОФП с учетом влияния ветровой нагрузки: *a* — для объекта № 2; *b* — для объекта № 3  
**Fig. 4.** General view of calculation models and the spread of hazardous fire factors, taking into account the influence of wind load: *a* — for facility No. 2; *b* — for facility No. 3

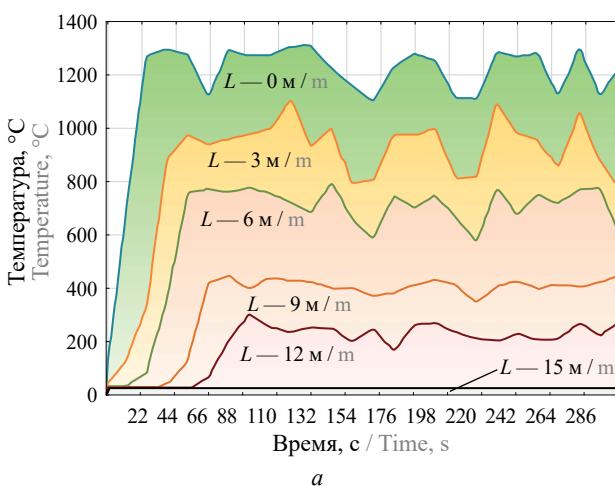


**Рис. 5.** Горизонтальная проекция областей распространения ОФП для: *a* — объекта № 1; *b* — объекта № 2; *c* — объекта № 3  
**Fig. 5.** Horizontal projection of areas affected by hazardous fire factors for: *a* — facility No. 1; *b* — facility No. 2; *c* — facility No. 3



**Рис. 6.** Сравнение областей распространения ОФП при пожаре на объекте № 1: *a* — без учета ветровой нагрузки; *b* — с учетом ветровой нагрузки  
**Fig. 6.** Comparison of the areas affected by hazardous fire factors during a fire at facility No. 1: *a* — without taking wind load into account; *b* — taking wind load into account

**Fig. 6.** Comparison of the areas affected by hazardous fire factors during a fire at facility No. 1: *a* — without taking wind load into account; *b* — taking wind load into account



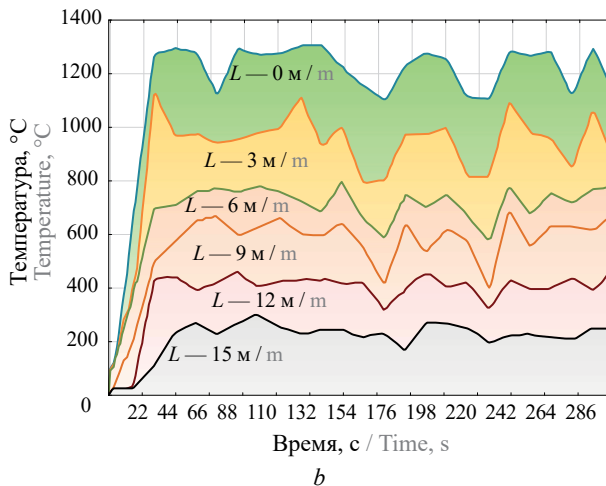
общий вид расчетных моделей (для объектов № 2 и 3) и температурных полей с учетом ветровой нагрузки.

Смещение ОФП, вызванное ветровой нагрузкой, хорошо заметно на виде сверху (рис. 5).

На рис. 6 показаны области распространения ОФП при пожаре на объекте № 1 без учета ветровой нагрузки и с ее учетом. Рис. 6, *b* получен путем наложения друг на друга областей распространения ОФП при каждом отдельно взятом рассматриваемом направлении ветра.

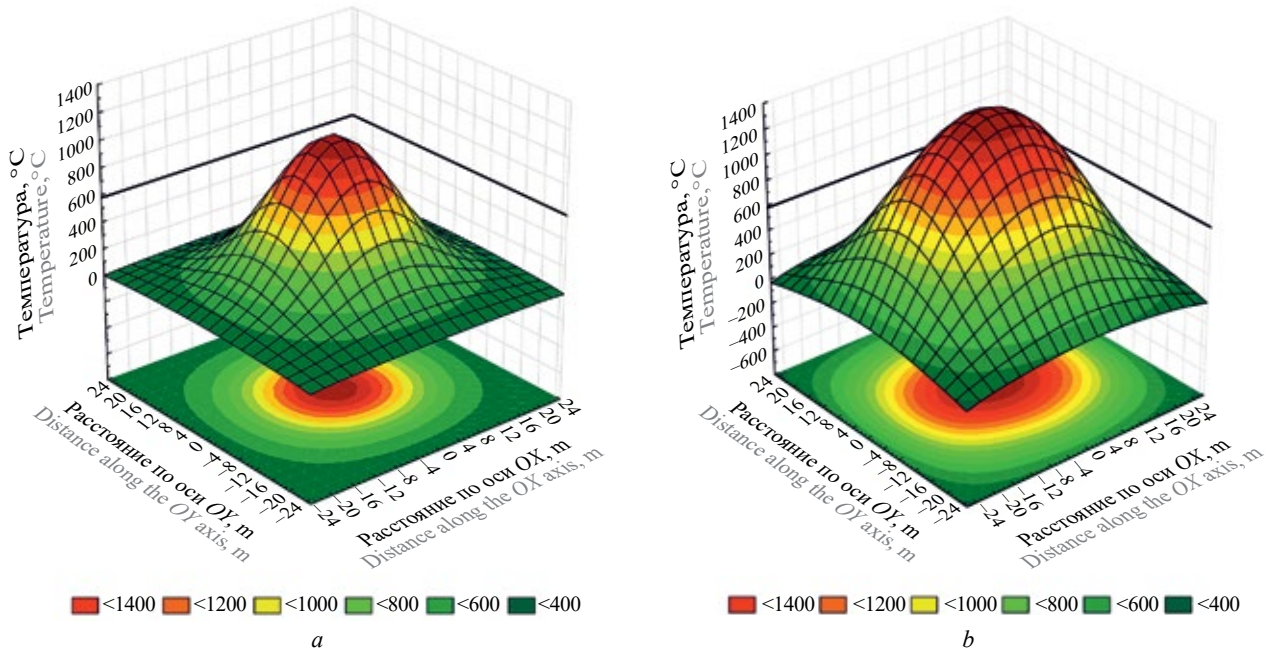
Датчики, установленные на расстоянии от 0 до 15 м с шагом 3 м от очага пожара, фиксировали изменения температуры окружающей среды в процессе моделирования. Показания для каждого датчика приведены на рис. 7.

На рис. 8 представлены трехмерные графики распределения температуры в горизонтальной плоскости по завершении моделирования. Горизонтальная черная линия отсекает температуру, являющуюся



**Рис. 7.** Зависимость температуры окружающей среды от времени для контрольных точек объекта № 1: *a* — без учета ветровой нагрузки; *b* — с учетом ветровой нагрузки  
**Fig. 7.** Dependence of ambient temperature on time for control points of object No. 1: *a* — without taking wind load into account; *b* — taking wind load into account

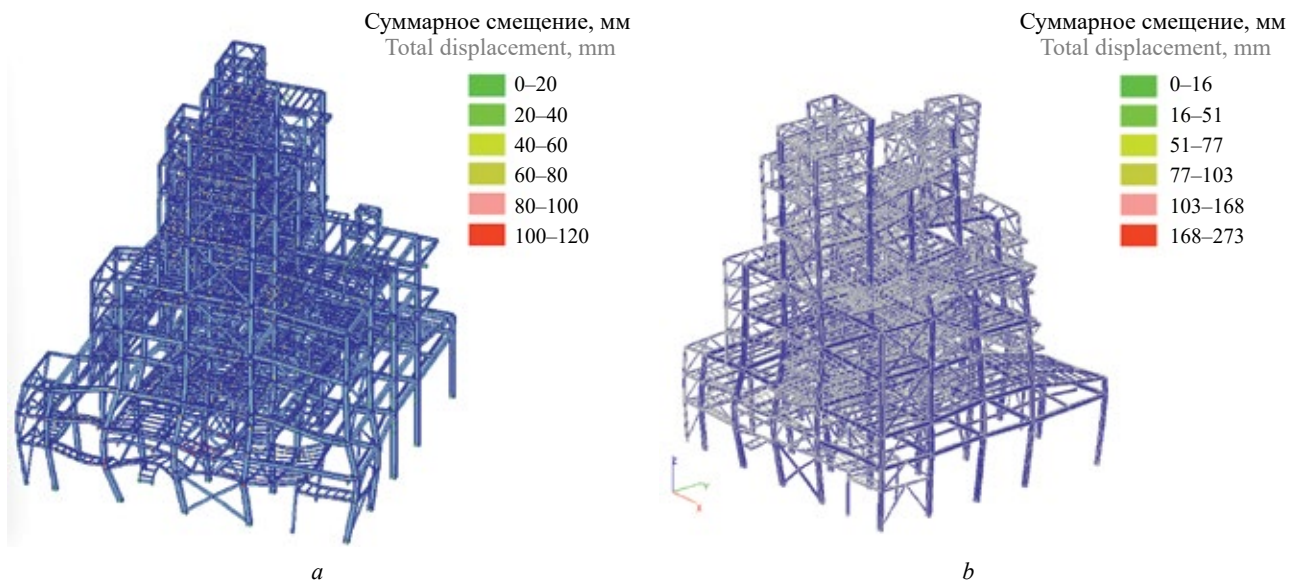
**Fig. 7.** Dependence of ambient temperature on time for control points of object No. 1: *a* — without taking wind load into account; *b* — taking wind load into account



**Рис. 8.** Распределение температуры среды вокруг объекта № 1: *a* — без учета ветровой нагрузки; *b* — с учетом ветровой нагрузки  
**Fig. 8.** Distribution of the ambient temperature around object No. 1: *a* — without wind load; *b* — with wind load

**Таблица 3.** Влияние ветровой нагрузки на радиус зоны воздействия пожара для объектов  
**Table 3.** The influence of wind load on the radius of the fire impact zone for facilities

Номер объекта Object Number	Мощность пожара, МВт Fire power, MW	Принятая скорость ветра, м/с Accepted wind velocity, m/s	Радиус зоны воздействия пожара, м Radius of the fire impact zone, m	Радиус зоны воздействия пожара с учетом ветровой нагрузки, м Radius of the fire impact zone, taking into account wind load, m	Изменение зоны воздействия пожара, м Fire impact zone change, m
1	305,24	7,7	10,7	19,3	8,6
2	785,18	3,2	13,6	18,1	4,5
3	349,76	4,1	11,5	16,4	4,9



**Рис. 9.** Деформированная конструктивная схема объекта № 3: *a* — без учета ветровой нагрузки; *b* — с учетом ветровой нагрузки  
**Fig. 9.** Deformed structures of object No. 3: *a* — without taking wind load into account; *b* — taking wind load into account

критической для конструкций объекта № 1, определенную в работе [21]. Горизонтальное смещение пламени составило от 2 до 6 м.

По рис. 8 хорошо заметно влияние ветровой нагрузки на радиус зоны повышенной температуры. Величина непосредственно прироста радиуса данной зоны составила от 4,5 до 8,6 м.

Результаты моделирования для каждого из рассматриваемых объектов приведены в табл. 3.

В качестве визуализации в расчетной модели в SCAD приложена температурная нагрузка, соответствующая результатам моделирования в Pyrosim. На рис. 9, *a* показана деформированная схема объекта № 3 при пожаре пролива без учета ветровой нагрузки. Заметны деформации конструкций в зоне, прилегающей к очагу возгорания. Рис. 9, *b* демонстрирует искривление конструкций объекта № 3 с учетом ветра. Здесь наблюдаются деформации конструкций в области смещения ОФП.

### Заключение

В ходе работы проанализирована проектная документация на объекты нефтегазовой промышленности. Нормативное значение ветровой

нагрузки для каждого сооружения принято согласно СП 131.13330<sup>4</sup>. Влияние на величину ветровой нагрузки оказывает расположение объекта: открытые территории, близость к побережьям морей и т.п. Для каждого объекта определена зависимость ветровой нагрузки от высоты сооружения с использованием теории Монино – Обухова.

Вычисленные скорости ветра учтены в полевой модели объектов в ПК Pyrosim. По завершении расчета выявлен прирост радиуса зоны влияния пожара от 4,5 до 8,6 м. Полученные результаты демонстрируют заметное смещение пламени и, следовательно, области высоких температур относительно очага пожара. При этом заметно, что максимальная температура в непосредственной близости от центра возгорания в расчете, учитывающем ветровую нагрузку, не снижается относительно моделирования без ветра. Увеличивается лишь радиус влияния пожара.

Таким образом, пренебрежение ветровой нагрузкой при определении пределов огнестойкости конструкций и проектировании огнезащиты недопустимо, поскольку ветер может значительно увеличить площадь зоны влияния пожара и, следовательно, объем металлоконструкций, подлежащих огнезащите.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Расчет огнестойкости конструкций из стали с повышенными показателями огнестойкости для объектов нефтегазовой промышленности // Территория Нефтегаз. 2007. № 4. С. 72–77. EDN LJMUEX.
2. Епищенко С.В., Усков А.В. Экспериментальное исследование по использованию диоксида углерода для пожаротушения в резервуарах с нефтью и нефтепродуктами // Актуальные вопросы общества, науки и образования : сб. ст. XX Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 20 марта 2025 года. Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. С. 60–65. EDN MTDFDV.
3. Dehkordi M.K., Behnam B., Pirbalouti R.G. Probabilistic fire risk analysis of process pipelines // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. No. 80. P. 104907. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104907. EDN AMHAMR.
4. Хасанов И.Р., Гравит М.В., Косачев А.А., Пехотиков 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. № 23 (3). С. 49–57. EDN SFOCFE.
5. Абрамов И.В., Гравит М.В., Гумерова Э.И. Повышение пределов огнестойкости судовых и строительных конструкций при углеводородном температурном режиме // Газовая промышленность. 2018. № 5 (768). С. 108–117. EDN XMYFSP.
6. 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. № 30 (5). С. 5–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22. EDN MNGMRT.
7. Kashi E., Bahoosh M. Jet fire assessment in complex environments using computational fluid dynamics // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2020. No. 37 (1). Pp. 203–212. DOI: 10.1007/s43153-019-00003-y. EDN GUWZFG.
8. Шебеко А.Ю. Оценка требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций этажерок и эстакад предприятий нефтегазовой отрасли // Пожарная безопасность. 2019. № 1. С. 103–107. EDN YZZZML.
9. Džolev I., Kekez S., Rašeta A. Fire Resistance of Steel Beams with Intumescent Coating Exposed to Fire Using ANSYS and Machine Learning // Buildings. 2025. No. 15 (13). P. 2334. DOI: 10.3390/buildings15132334

10. Chen W., Qin Q., Wang X., Li J., Liang M. Chen Zh. et al. Study on the Fire Resistance of Axially Restrained H-Shaped Steel Beams Under Real Fire // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2025. No. 15 (13). P. 7424. DOI: 10.3390/app15137424
11. Simão P.D., Rodrigues J.P.C. Direct evaluation of fire resistance for restrained steel columns in frames using consistent rigid-plastic models and energy formulations // *Engineering Structures*. 2023. No. 276. P. 115344. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115344. EDN MGXULQ.
12. Tian Zh., Chen X., Suendermann B., Gamble G., Huang Z., Tang Y. Wind Effect on External Fire Spread through Openings under the Protection of Horizontal Projections or Vertical Spandrels — A Numerical Study // *Fire*. 2024. No. 7 (3). P. 66. DOI: 10.3390/fire7030066. EDN LEEHQP.
13. Буянов В.И., Чертов В.А. Учет влияния направления ветра при обеспечении незадымляемости высотных зданий во время пожара // *Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2014. № 1 (3). С. 172–174. EDN VPSURD.
14. Shojaei Mehr R., Mohammadian Bishe E., Farhanien B., Afshin H. Numerical Investigation of the Combined Effect of Terrain Slope and Wind Velocity on Fire Spread Rate in Natural Pastures // *Modelling — International Open Access Journal of Modelling in Engineering Science*. 2025. No. 6 (1). P. 15. DOI: 10.3390/modelling6010015. EDN BQERSU.
15. Javaloyes M.A., Pendas-Recondo E., Sánchez M. A General Model for Wildfire Propagation with Wind and Slope // *SIAM Journal on Applied Algebra and Geometry*. 2023. No. 7 (2). Pp. 414–439. DOI: 10.1137/22m1477866. EDN LZMZRI.
16. Ghodrat M., Edalati Nejad A., Simeoni A. Collective Effects of Fire Intensity and Sloped Terrain on Wind-Driven Surface Fire and Its Impact on a Cubic Structure // *Fire*. 2022. No. 5 (6). P. 208. DOI: 10.3390/fire5060208. EDN QBGKOP.
17. Eftekharian E., Ghodrat M., He Y., Ong R.H., Kwok K.C.S., Zhao M. Numerical Analysis of the Effect of Fire Source Configuration on Fire-Wind Enhancement // *Heat Transfer Engineering*. 2019. No. 42 (1). Pp. 41–60. DOI: 10.1080/01457632.2019.1685249.
18. Eftekharian E., Ghodrat M., He Y., Zhao M., Ong R.H., Kwok K.C.S. Numerical analysis of wind velocity effects on fire-wind enhancement // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019. No. 80. P. 108471. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.108471. EDN AKQEAE.
19. Beshir M.R., Mohamed M., Kouritem S.A., Lemmert C.K., Centeno F.R., Rush D. Investigating Numerically the Effect of Wind on Fire Spread Between Two Informal Settlements Dwellings // *Fire Technology*. 2023. No. 61. Pp. 1233–1268. DOI: 10.1007/s10694-023-01374-y. EDN SALEGS.
20. Гравит М.В., Мамедов Э.З. Моделирование огнестойкости стальных конструкций эстакад нефтегазовых месторождений при кустовом расположении скважин // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2024. № 33 (4). С. 36–51. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.36-51. EDN IGFEYS.
21. Гравит М.В., Мамедов Э.З., Дмитриев И.И. Методика расчета фактических и обоснование требуемых пределов огнестойкости стальных конструкций эстакад и этажерок нефтегазового комплекса // *Вестник газовой промышленности*. 2025. № 1 (61). С. 201–214. EDN FKUNAK.
22. Барашкова Н.К., Кижнер Л.И., Кужевская И.В. Атмосферные процессы: динамика, численный анализ, моделирование : учебное пособие. Томск : ТМЛ-Пресс, 2010. 312 с.

## REFERENCES

1. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Calculation of fire resistance of steel structures with increased fire resistance indicators for oil and gas industry facilities. *Territorija neftegaz/Territory of Oil and Gas*. 2007; 4:72-77. EDN LJMUEX. (rus).
2. Epishchenko S.V., Uskov A.V. Experimental research on the use of carbon dioxide for fire extinguishing in tanks with oil and petroleum products. Current issues of society, science and education : *Collection of articles from the XX International scientific and practical conference, Penza, March 20, 2025*. Penza, Science and Education (IP Gulyaev G.Yu.), 2025; 60-65. EDN MTDFDV. (rus).
3. 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. EDN AMHAMP.
4. Khasanov I.R., Gravit M.V., Kosachev A.A., Pekhotnikov A.V., Pavlov B.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. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(3):49-57. EDN SFOCFF. (rus).
5. 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*. 2018; 5(768):108-117. EDN XMYFSP. (rus).

6. Klementev B.A., Kalach A.V., Gravit M.V. 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. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):5-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22. EDN MNGMRT. (rus).
7. 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. EDN GUWZFG.
8. 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).
9. Džolev I., Kekez-Baran S., Rašeta A. Fire Resistance of Steel Beams with Intumescent Coating Exposed to Fire Using ANSYS and Machine Learning. *Buildings*. 2025; 15(13):2334. DOI: 10.3390/buildings15132334
10. Chen W., Qin Q., Wang X., Li J., Liang M., Chen Z., Yang T. Study on the Fire Resistance of Axially Restrained H-Shaped Steel Beams Under Real Fire. *Applied Sciences*. 2025; 15(13):7424. DOI: 10.3390/app15137424
11. Simão P.D., Rodrigues J.P.C. Direct evaluation of fire resistance for restrained steel columns in frames using consistent rigid-plastic models and energy formulations. *Engineering Structures*. 2023; 276:115344. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115344. EDN MGXULQ.
12. Tian Zh., Chen X., Suendermann B., Gamble G., Huang Z., Tang Y. Wind Effect on External Fire Spread through Openings under the Protection of Horizontal Projections or Vertical Spandrels — A Numerical Study. *Fire*. 2024; 7(3):66. DOI: 10.3390/fire7030066. EDN LEEHQP.
13. Buyanov V.I., Chertov V.A. Taking into account the influence of wind direction when ensuring smoke-free operation of high-rise buildings during a fire. *Problems of ensuring safety during emergency response*. 2014; 1(3):172-174. EDN VPSURD. (rus).
14. Shojaei Mehr R., Mohammadian Bishe E., Farhanieh B., Afshin H. Numerical Investigation of the Combined Effect of Terrain Slope and Wind Velocity on Fire Spread Rate in Natural Pastures. *Modelling*. 2025; 6(1):15. DOI: 10.3390/modelling6010015. EDN BQERSU.
15. Javaloyes M.A., Pendás-Recondo E., Sánchez M.A. General Model for Wildfire Propagation with Wind and Slope. *SIAM Journal on Applied Algebra and Geometry*. 2013; 7(2):414-439. DOI: 10.1137/22M1477866. EDN LZMZRI.
16. Ghodrat M., Edalati-Nejad A., Simeoni A. Collective Effects of Fire Intensity and Sloped Terrain on Wind-Driven Surface Fire and Its Impact on a Cubic Structure. *Fire*. 2022; 5(6):208. DOI: 10.3390/fire5060208. EDN QBGKOP.
17. Eftekharian E., Ghodrat M., He Y., Ong R.H., Kwok K.C.S., Zhao M. Numerical Analysis of the Effect of Fire Source Configuration on Fire-Wind Enhancement. *Heat Transfer Engineering*. 2019; 42(1):41-60. DOI: 10.1080/01457632.2019.1685249
18. Eftekharian E., Ghodrat M., He Y., Zhao M., Ong R.H., Kwok K.C.S. Numerical analysis of wind velocity effects on fire-wind enhancement. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019; 80:108471. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.108471. EDN AKQEAE.
19. Beshir M.R., Mohamed M., Kouritem S.A., Lemmert C.K., Centeno F.R., Rush D. Investigating Numerically the Effect of Wind on Fire Spread Between Two Informal Settlements Dwellings. *Fire Technology*. 2023; 61:1233-1268. DOI: 10.1007/s10694-023-01374-y. EDN SALEGS.
20. 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. EDN IGFEYS. (rus).
21. Gravit M.V., Mamedov E.Z., Dmitriev I.I. Procedure for calculating factual fire endurance and validation of the corresponding guide standards for steel-framed pipe racks of oil-and-gas production facilities. *Bulletin of the gas industry*. 2025; 1(61):191-204. EDN FKUNAK. (rus).
22. Barashkova N.K., Kizhner L.I., Kuzhevskaya I.V. Atmospheric Processes: Dynamics, Numerical Analysis, and Modeling : *textbook*. Tomsk, TML-Press, 2010; 312.

Поступила 30.07.2025, после доработки 03.09.2025;

принята к публикации 03.09.2025

Received July 30, 2025; Received in revised form September 03, 2025;

Accepted September 03, 2025

### Информация об авторах

**ГРАВИТ Марина Викторовна**, к.т.н., доцент, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Поли-

### Information about the authors

**Marina V. GRAVIT**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, vn. terg. municipal district Akademicheskaya, Politeknicheskaya St., 29, letter B, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ORCID:

техническая, 29, литера Б; ORCID: 0000-0003-1071-427X; ResearcherID: B-4397-2014; AuthorID: 56826013600; e-mail: marina.gravit@mail.ru

0000-0003-1071-427X; ResearcherID: B-4397-2014; AuthorID: 56826013600; e-mail: marina.gravit@mail.ru

**МАМЕДОВ Эльдар Захирович**, специалист, ООО «Запсибгазпром-Газификация», Россия, 625059, г. Тюмень, тракт Велижанский 6 км, 11, помещ. 207; ORCID: 0009-0008-4470-2465; e-mail: el.mamedov7578@gmail.com

**Eldar Z. MAMEDOV**, specialist, “Zapsibgazprom-Gazifikatsiya” LLC, Velizhansky tract 6 km, 11, room 207, Tyumen region, Tyumen, 625059, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-4470-2465; e-mail: el.mamedov7578@gmail.com

**АНТОНОВ Максим Дмитриевич**, инженер, ООО «Метропроект», 196233, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Гагаринское, пр-т Витебский, 109, литера В, помещ. 2-N; ORCID: 0009-0009-7146-1668; e-mail: antomaxnov2019@yandex.ru

**Maksim D. ANTONOV**, engineer, “Metroproject” LLC, internal territory of the city municipal district Gagarinskoye, Vitebsky Ave., 109B, room 2-N, St. Petersburg, 196233, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-7146-1668; e-mail: antomaxnov2019@yandex.ru

**Вклад авторов:** *все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*  
*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Contribution of the authors:** *the authors contributed equally to this article.*  
*The authors declare no conflicts of interests.*