

# Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования

Ирина Николаевна Пожаркова<sup>1,2</sup> ✉

<sup>1</sup> Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Красноярский край, г. Железногорск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Обоснование безопасности эксплуатации подземной исследовательской лаборатории объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов требует в том числе оценки огнестойкости горной породы, в толще которой она сооружается. При этом выбор основных параметров соответствующих огневым испытаниям определяется температурным режимом, а также длительностью нагрева горной породы при пожаре. Одним из эффективных способов оценки указанных факторов в условиях, когда отсутствует возможность проведения натурного эксперимента или создания полномасштабной физической модели проектируемого объекта, является компьютерное моделирование динамики пожара.

**Цель работы** заключается в оценке температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории с учетом влияния геометрических параметров и глубины заложения горизонтальной горной выработки, характеристик используемой системы вентиляции, горючей нагрузки, теплофизических свойств минералов, ограждающих свободное пространство.

**Методы.** Для моделирования динамики пожара в работе применяется программная платформа FDS, предназначенная для проведения соответствующих расчетов. Исследование влияния различных факторов на результаты выполняется путем модификаций базовой модели, обоснование и основные настроечные параметры которых представлены в соответствующем разделе.

**Результаты и их обсуждение.** На основе серии компьютерных экспериментов с различными настроечными параметрами модели было установлено, что существенное влияние на результаты расчета оказывают: глубина заложения горизонтальной выработки, расход энергии на нагрев горной породы, параметры используемой системы вентиляции, а также в отдельных случаях размеры ячеек расчетной сетки.

**Выводы.** На основе анализа результатов моделирования был выявлен ряд особенностей объекта исследования, которые следует учитывать при проведении соответствующих компьютерных экспериментов и натурных испытаний. Разработанную компьютерную модель можно применять для оценки эффективности систем противопожарной защиты на объекте, исследования прогрева ограждений при различных сценариях пожара. Полученные по результатам моделирования параметры температурного режима при пожаре можно использовать для проведения огневым испытаниям образцов горных пород, составляющих ограждения сооружений подземного комплекса.

**Ключевые слова:** моделирование пожара; вычислительная гидродинамика; FDS; расчетные сетки; тоннель; горная выработка; тепловое воздействие

**Благодарности.** Автор выражает признательность красноярскому филиалу ИБРАЭ РАН за оказанную помощь при проведении данного исследования и предоставленные материалы.

**Для цитирования:** Пожаркова И.Н. Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 22–35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.22-35

✉ Пожаркова Ирина Николаевна, e-mail: [pozharokova@mail.ru](mailto:pozharokova@mail.ru)

## Investigation of fire temperature regime in an underground research laboratory based on numerical modelling

Irina N. Pozharkova<sup>1,2</sup> ✉

<sup>1</sup> Siberian Fire and Rescue Academy of Emercom of Russia, Krasnoyarsk Region, Zheleznogorsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

**ABSTRACT**

**Introduction.** Justification of safety of operation of an underground research laboratory for the final isolation of radioactive waste requires, among other things, an assessment of the fire resistance of the rock in which it is constructed. In this case, the choice of the main parameters of the corresponding fire tests is determined by the temperature regime, as well as the duration of heating of the rock during the fire. One of the effective ways to assess these factors, in conditions where there is no possibility of conducting a full-scale experiment or creating a full-scale physical model of the designed object, is computer modelling of fire dynamics.

**Aims and objectives.** The aim of the work is to assess the temperature regime of the fire in an underground research laboratory, taking into account the influence of geometric parameters and the depth of horizontal mine opening, the characteristics of the ventilation system used, the combustible load, and the thermophysical properties of the minerals enclosing the free space.

**Methods.** To simulate fire dynamics, the work uses the FDS software platform, designed to carry out the corresponding calculations. The study of the influence of various factors on the results is carried out by modifying the basic model, the rationale and main tuning parameters of which are presented in the corresponding section.

**Results and discussion.** Based on a series of computer experiments with various tuning parameters of the model, it was found that the calculation results are significantly influenced by: the depth of the horizontal excavation, the energy consumption for heating the rock, the parameters of the ventilation system used, and also, in some cases, the dimensions of the calculation grid cell.

**Conclusions.** Based on the analysis of the modelling results, a number of features of the research object were identified that should be taken into account when conducting appropriate computer experiments and full-scale tests. The developed computer model can be used to assess the effectiveness of fire protection systems at the facility and study the heating of enclosures under various fire scenarios. The parameters of the temperature regime during the fire obtained from the modelling results can be used to conduct fire tests of rock samples that make up the enclosures of the underground complex structures.

**Keywords:** fire modelling; CFD; FDS; computational grids; tunnel; mining; excavation; thermal effect

**Acknowledgments.** The author expresses gratitude to the Krasnoyarsk branch of the Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences for the assistance provided during this research and the materials provided.

**For citation:** Pozharkova I.N. Investigation of fire temperature regime in an underground research laboratory based on numerical modelling. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):22-35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.22-35 (rus).

✉ *Irina Nikolaevna Pozharkova*, e-mail: [pozharkova@mail.ru](mailto:pozharkova@mail.ru)

**Введение**

Создание подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) является одним из первых этапов сооружения объекта глубинной изоляции радиоактивных отходов для обоснования безопасности захоронения<sup>1</sup>. ПИЛ включает горизонтальные выработки длиной 147 м и сечением около 40 м<sup>2</sup>, расположенные на глубине 450–525 м в массиве горной породы Енисейского участка, соединенные между собой и с поверхностью системой вертикальных стволов и скважин [1].

Анализ возможных аварийных ситуаций на объекте показал, что существует вероятность возникновения пожара, в том числе, в комплексе подземных сооружений. Для подтверждения безопасности эксплуатации объекта необходима оценка огнестойкости горной породы, составляющей ограждение подземного комплекса. Выбор температур при про-

ведении огневых испытаний образцов должен быть обоснован вероятными значениями температуры газовой среды при пожаре в ПИЛ, а также длительностью нагрева горной породы. На данные факторы, помимо скорости тепловыделения, определяемой свойствами горючей нагрузки, существенное влияние будут оказывать геометрия пространства ПИЛ и особенности газообмена выработок подземного комплекса.

Современные технологии исследования динамики пожаров включают компьютерное моделирование наблюдаемых при горении физических процессов, результаты которого используются как в научных работах [2–23], так и в обосновании соответствия объектов требованиям и нормам пожарной безопасности согласно отечественным<sup>2, 3</sup> или зару-

<sup>1</sup> Материалы обоснования лицензии на сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории (включая предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду). Т. 1 // ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»: сайт. URL: [https://www.nora.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B\\_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf](https://www.nora.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf) (дата обращения: 01.03.2024).

<sup>2</sup> Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: Приказ МЧС РФ от 10.07.2009 № 404 // КонсультантПлюс: URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_91229/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91229/) (дата обращения: 01.03.2024).

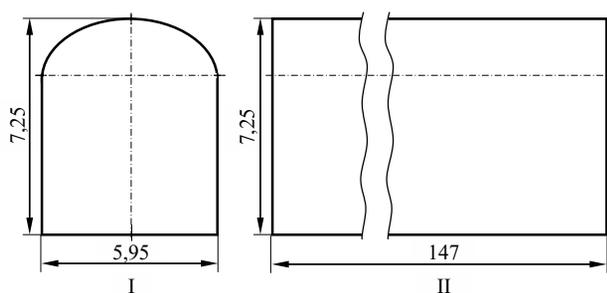
<sup>3</sup> Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 14.11.2022 № 1140 // КонсультантПлюс: URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_442656/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_442656/) (дата обращения: 01.03.2024).

бежным<sup>4, 5</sup> методикам. Подобный подход является безальтернативным, когда предметом исследования является пожар в проектируемом сооружении, в котором невозможно провести натурные испытания или создать для него полномасштабную физическую модель [24]. Моделирование пожара в ПИЛ с применением актуальных верифицированных методик позволит выявить возможные диапазоны изменения параметров газовой среды в результате возгорания в подземном комплексе.

Целью работы, которой посвящена настоящая статья, являлось проведение на основе компьютерного моделирования оценочного расчета температурного режима пожара с учетом: геометрических параметров ПИЛ, глубины заложения соответствующих горных выработок, расположения и интенсивности вентиляции, характеристик горючей нагрузки, теплофизических свойств горной породы.

ПИЛ включает подземные горизонтальные горные выработки, длина прямолинейного участка которых (147 м) значительно превышает размеры поперечного сечения ( $5,95 \times 7,25$  м)<sup>1</sup>. По геометрическим характеристикам выработки наиболее близки к тоннельным сооружениям со сводчатой формой верхней части и вертикальными стенками (рис. 1).

В отечественных и зарубежных исследованиях, посвященных моделированию пожаров в тоннелях транспортной инфраструктуры [24], в первую очередь рассматриваются вопросы обеспечения безопасности эвакуирующихся людей, участников тушения пожара и аварийно-спасательных работ на основе анализа распространения опасных факторов пожара [2–4, 6–8, 10, 21]. Ряд авторов [2, 7, 10–13, 15, 17, 18, 20–23] обосновывают целесообразность применения компьютерного моделирования для проверочных рас-



**Рис. 1.** Ориентировочные проектные размеры, м, горизонтальных выработок ПИЛ<sup>1</sup>: I — поперечное сечение; II — продольное сечение

**Fig. 1.** Approximate design dimensions of horizontal workings, m, of an underground research laboratory<sup>1</sup>: I — cross section; II — longitudinal section

<sup>4</sup> Standard for Smoke and Heat Venting : NFPA 204 // National Fire Protection Association : URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/2/0/4/nfpa-204> (дата обращения: 01.03.2024).

<sup>5</sup> Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide (NPP FIRE MAG) // U.S. Nuclear Regulatory Commission. 2012. No. NUREG-1934 (EPRI 1019195).

четов систем вентиляции и пожаротушения в тоннелях. Также следует выделить некоторые работы [5, 8–10], в которых представлены результаты исследования возможности потери несущей способности строительными конструкциями тоннелей вследствие нагрева при пожаре.

Большинство специалистов [3–7, 9, 10, 13–17, 19, 21–23] для моделирования пожаров используют методы вычислительной гидродинамики (CFD) и реализующие их программные средства, в том числе FDS [5, 6, 9, 10, 13, 17, 19, 21], Fluent [15, 17, 23], CFX [16], SOFIE [3, 4, 7], JASMINE [14]. CFD-модели, предназначенные для расчета тепло-массопереноса при горении, основаны на численном решении системы уравнений газодинамики потоков в частных производных, а именно уравнений: сохранения массы, сохранения импульса, сохранения энергии, состояния. Многократная проверка адекватности численных моделей подтвердила, что CFD обеспечивает реалистичные прогнозы полей скорости и температуры газовой среды при пожаре вдали от источника огня, но дает существенные ошибки вблизи пламени<sup>6</sup>.

Известным недостатком моделирования на основе методов вычислительной гидродинамики является низкая скорость расчета и требовательность к вычислительным ресурсам, многократно возрастающая при увеличении объема изучаемого пространства и степени детализации процессов. Существуют исследования, в которых указывается возможность применения для расчета параметров пожара в тоннелях более простых в математическом отношении аналитических и одномерных моделей [2, 8, 11, 12, 14, 16, 18, 20], а также гибридных моделей, основанных на комбинации нескольких методов [15, 22]. Авторы соответствующих публикаций делают акцент на возможности увеличения за счет их использования скорости расчета относительно методов CFD при сохранении приемлемой точности с точки зрения решаемых задач. При этом отмечается более узкая область применимости подобных моделей по сравнению с CFD.

Помимо возможности высокой степени детализации процессов в различных областях пространства, программные средства, реализующие CFD, позволяют создавать модели со сложной трехмерной геометрией. В работах [2–7, 9, 10, 14, 16, 17, 20–22] пространство исследуемого тоннеля имеет прямоугольное сечение, что, возможно, оправдано в случае оценки параметров газовой среды преимущественно на высоте рабочей зоны для анализа воздействия опасных факторов пожара на эвакуирующихся людей. Такой подход позволяет загустить расчетную сетку, тем самым увеличив скорость расчета. Однако в случае необхо-

<sup>6</sup> Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide, Volume 3: Validation // NIST Special Publication 1018-3, 2023.

димости построения температурных полей для определения теплового воздействия на ограждающие поверхности надо детально учитывать пристеночные турбулентные течения в газовой среде, которые влияют на теплообмен [15]. Следовательно, модель должна иметь более сложную геометрию, чем прямоугольный параллелепипед, а именно воспроизводить сводчатую форму верхней части горной выработки (рис. 1), аналогично тому, как это выполнено для тоннельного сооружения в [8, 12, 13, 15, 23]. При этом количество ячеек расчетной сетки возрастает.

В [5] описан опыт моделирования пожара в автотранспортном тоннеле, на основании которого авторы делают вывод о существенном влиянии на температуру газовой среды тепловых потерь, связанных с поглощением ограждающими конструкциями. При этом математическое моделирование теплопереноса выполнялось с учетом теплофизических параметров бетона.

Следует отметить, что в большинстве опубликованных работ рассматриваются сооружения, расположенные вблизи поверхности (автотранспортные [3–5, 7, 9, 14, 15, 17, 18, 20], железнодорожные [6, 10, 14] тоннели) или на глубине нескольких десятков метров (тоннели метрополитена [2, 8, 11, 12, 14]), что позволяет при формировании исходных данных для расчета использовать нормальное атмосферное давление. Уникальностью комплекса сооружений ПИЛ является заглубление на сотни метров относительно поверхности, что предположительно может оказать влияние на распределение давлений в пространстве горизонтальных выработок и вертикальных стволов, стратификацию плотности среды, особенности газообмена и динамику горения.

Таким образом, представляет интерес исследование температурного режима пожара в ПИЛ при вариации следующих настроек модели: расстояние моделируемого пространства до внешней среды, размер ячеек расчетной сетки модели, теплофизические характеристики поверхности твердых объектов, составляющих ограждение ПИЛ, способ задания вентиляционных отверстий.

## Материалы и методы

Для моделирования пожара в ПИЛ использована программная платформа Fire Dynamics Simulator (FDS), реализующая CFD-модель теплопереноса при горении. FDS выполняет численное решение уравнений Навье–Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, дополненных LES моделью турбулентности<sup>7</sup>. Данный программный продукт многократно верифицирован различ-

<sup>7</sup> Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model // NIST Special Publication 1018-1, 2023.

ными группами исследователей<sup>8</sup>. Также существуют примеры валидации результатов расчета в FDS параметров пожара в тоннелях [13, 17, 21, 23], которые показывают их высокую сходимость с данными натуральных экспериментов. Таким образом, за исключением областей, находящихся в непосредственной близости к пламени, в рамках решаемой задачи FDS позволяет получить приемлемую точность прогноза температур газовой среды при пожаре в ПИЛ.

Создание трехмерной модели, ввод исходных данных и визуализация результатов моделирования выполнялись на базе программного комплекса Pyrosim<sup>9</sup>, который является оболочкой, реализующей графический интерфейс ядра FDS.

Пространство базовой полномасштабной модели горизонтальной выработки ПИЛ образовано комбинацией шести ортогональных расчетных сеток (рис. 2, а), которые имеют меньшие размеры ячеек вблизи зоны горения, а также в верхней части модели (для более точной имитации формы свода). Количество ячеек в сетках, согласно рекомендациям разработчиков программной платформы FDS, по каждой координатной оси выбрано кратным  $2^i 3^m 5^n$ , где  $i$ ,  $m$  и  $n$  — целые числа<sup>9</sup>. Общее количество ячеек сетки — 1 422 720. Нижняя координата свободного пространства — 525 м.

Поскольку одним из вопросов исследования, которому посвящена настоящая статья, являлось изучение чувствительности результатов моделирования к размерам ячеек сетки (см. ниже), координаты элементов при построении модели выбраны кратными 0,6 м. В этом случае геометрия модели для расчета в FDS, а также расположение измерительных элементов не искажаются для размеров ячеек сетки 0,2; 0,3 и 0,6 м (делители числа 0,6). При этом модельные размеры выработки ПИЛ (длина, ширина, высота) отличаются от реальных не более чем на 0,84 %.

Ограждающие конструкции имеют толщину около 0,6 м и теплофизические параметры, которые получены экспериментально при исследовании горных пород Енисейского участка [1] (табл. 1).

В модели применена упрощенная схема естественной вентиляции, которая реализована элементами системы HVAC, включающей вентиляционное отверстие (табл. 1), расположенное в торцевой части выработки, а также соответствующую пару внутренних и внешних узлов, воздуховод. Необходимая связь внутреннего пространства модели с окружающей средой осуществляется через перечисленные элементы системы HVAC.

<sup>8</sup> Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 2: Verification // NIST Special Publication 1018-2, 2023.

<sup>9</sup> Pyrosim2023.3. Руководство пользователя // FireCat—pyrosim.ru: URL: [https://www.pyrosim.ru/download/Pyrosim\\_manual.pdf](https://www.pyrosim.ru/download/Pyrosim_manual.pdf) (дата обращения: 01.03.2024).

Таблица 1. Параметры моделирования  
Table 1. Simulation parameters

Параметр Parameter	Базовая модель Basic model	Модифицированная модель Modified model	
Размер ячеек сетки $a$ по осям $X, Y, Z$ , м (в центральной части; в верхней части; в нижней части) Grid cell size $a$ along the $X, Y, Z$ axes, m (in the central part; at the top; in the lower part)	0,1 × 0,1 × 0,1; 0,1 × 0,3 × 0,1; 0,3 × 0,3 × 0,3	0,1 × 0,1 × 0,1; 0,1 × 0,2 × 0,1; 0,2 × 0,2 × 0,2	0,1 × 0,1 × 0,1; 0,1 × 0,6 × 0,1; 0,6 × 0,6 × 0,6
Нижняя координата свободного пространства $Z$ , м Lower free space coordinate $Z$ , m	-525	-450	0
Теплофизические характеристики поверхности твердых объектов Thermophysical characteristics of the surface of solid objects	$c_w = 732$ Дж/кг·К; $\lambda_w = 2,7$ Вт/м·К; $\rho_w = 2585$ кг/м <sup>3</sup> $c_w = 732$ J/kg·K; $\lambda_w = 2.7$ W/m·K; $\rho_w = 2,585$ kg/m <sup>3</sup>	ADIABATIC	$c_w = 710$ Дж/кг·К; $\lambda_w = 2,37$ Вт/м·К; $\rho_w = 2500$ кг/м <sup>3</sup> $c_w = 710$ J/kg·K; $\lambda_w = 2.37$ W/m·K; $\rho_w = 2,500$ kg/m <sup>3</sup>
Вентиляция Ventilation	1 отверстие Ø6 м 1 hole Ø6 m	2 отверстия Ø6 м 2 hole Ø6 m	1 отверстие Ø0,6 м 1 hole Ø0.6 m
Площадь горючей нагрузки $S_r$ , м <sup>2</sup> Combustible load area $S_r$ , m <sup>2</sup>	8,64	17,28	4,32

С позиции ужесточения условий расчета для имитации наихудшего температурного воздействия на ограждения [5] принят ряд допущений. Во-первых, горючая нагрузка представлена индустриальным маслом со следующими показателями, определяющими скорость тепловыделения: низшая теплота сгорания  $Q_n = 42,7$  МДж/кг; удельная скорость выгорания  $\psi_{уд} = 0,043$  кг/(м<sup>2</sup>·с) [25]; коэффициент полноты горения  $\eta = 0,8$  (среднее значение для жидких углеводородов [26]). Выбор

данного вещества обусловлен высокими значениями  $Q_n$  и  $\psi_{уд}$  относительно других видов горючей нагрузки, присутствующей на объекте. Во-вторых, предполагается, что в момент начала моделирования горение возникает над всей поверхностью разлива жидкости, что возможно, если начальная температура индустриального масла существенно превышает нижний температурный предел его воспламенения [19]. В-третьих, считается, что толщина слоя жидкости такова, что за время моделирования

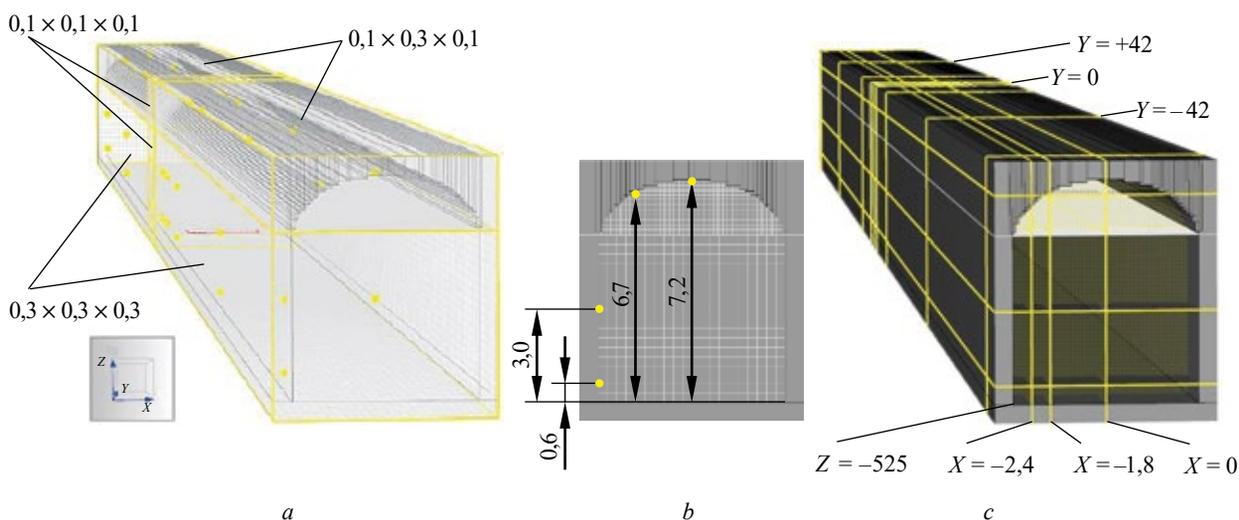


Рис. 2. Модель горизонтальной выработки ПИЛ:  $a$  — размеры ячеек сетки и измерительные датчики;  $b$  — расположение измерительных датчиков, м;  $c$  — расположение измерительных плоскостей, м  
Fig. 2. Model of horizontal excavation of an underground research laboratory:  $a$  — grid cell sizes and measuring sensors;  $b$  — location of measuring sensors, m;  $c$  — location of measuring planes, m

не наблюдается выгорание вещества на отдельных участках очага пожара. Таким образом, горение происходит с одинаковой скоростью тепловыделения в течение всего расчета.

Поверхность горения площадью  $S_f$  (табл. 1) расположена в центре основания горной выработки, который совпадает с началом координат по осям  $X$  и  $Y$ .

Параметры окружающей среды и прочие настройки модели приняты задаваемыми по умолчанию в программе Pygosim, в том числе: температура  $T = 20$  °С, плотность  $\rho = 1,2041$  кг/м<sup>3</sup> и теплоемкость  $C_p = 1005$  Дж/(кг·К) воздуха.

В модель добавлены следующие типы измерительных элементов, схема размещения которых в продольных и поперечных сечениях ПИЛ указана на рис. 2:

1) устройства измерения локальных значений температуры газовой среды, теплового потока, парциальной плотности и объемной концентрации кислорода (рис. 2, а, б);

2) плоскости для построения полей температуры газовой среды и парциальной плотности кислорода (рис. 2, с);

3) устройства измерения локальных значений скорости движения газовой среды, давления, плотности, а также скорости и массового расхода газа в воздуховоде.

Координаты датчиков для измерения локальных параметров газовой среды по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  совпадают с соответствующими плоскостями. Вдоль оси  $Y$  измерительные элементы расположены на расстояниях 0, ±3, ±12, ±42, ±72 м от геометрического центра свободного пространства. Поскольку модель во всех вариациях является симметричной относительно координатной плоскости  $ZOY$  (рис. 1), с целью сокращения расчетного времени и объема сохраняемых данных для измерений применя-

лись датчики и плоскости, расположенные только в одной половине модели.

Для проведения однофакторного эксперимента по исследованию влияния отдельных параметров модели на температурный режим пожара в базовую модель вносились изменения, систематизированные в табл. 1.

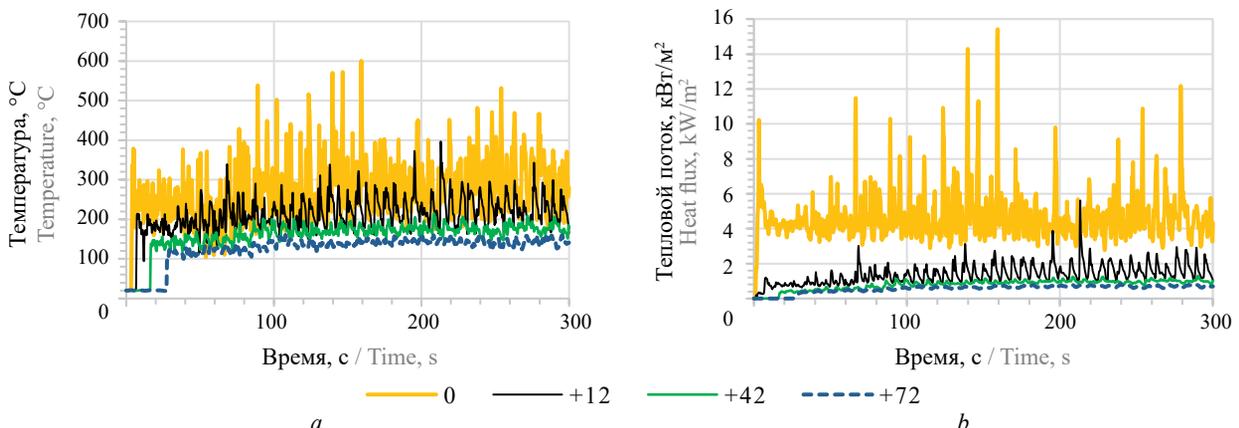
## Результаты и их обсуждение

В программе FDS на базе описанной модели и ее модификаций было проведено более 30 численных экспериментов с различными комбинациями входных данных. Далее представлены результаты опытов, которые соответствуют параметрам модели, перечисленным в табл. 1, и выбраны как наиболее репрезентативные.

При моделировании свободного развития пожара в ПИЛ с использованием базовой модели установлено, что наибольшая температура достигается в припотолочном слое газа непосредственно над очагом пожара. В этой области пиковые значения температуры превышают 600 °С, среднее значение температуры на развитой стадии пожара (ориентировочно после 150-й с модельного времени) составляет 305 °С (рис. 3, а).

Измерительные элементы, расположенные на высоте 3,0 м (за исключением пламенной зоны), фиксируют существенно меньшие значения температуры — до 206 °С в квазистационарном режиме пожара. Датчики, расположенные на высоте 0,6 м, находятся за пределами слоя нагретого газа.

Температуры в точках, равноудаленных по оси  $Y$  от центра очага пожара, в верхней части пространства близки, а в нижней части существенно отличаются и имеют более высокие значения в области, удаленной от вентиляции (рис. 4). При этом в окрестности воздуховода присутствуют выраженные колебания



**Рис. 3.** Временные графики температуры газовой среды и плотности теплового потока вблизи ограждений на высоте 6,7 м в плоскостях  $Y = 0$  м,  $Y = +12$  м,  $Y = +42$  м,  $Y = +72$  м

**Fig. 3.** Time graphs of the gaseous medium temperature and heat flux density near the enclosures at a height of 6.7 m in planes  $Y = 0$  m,  $Y = +12$  m,  $Y = +42$  m,  $Y = +72$  m

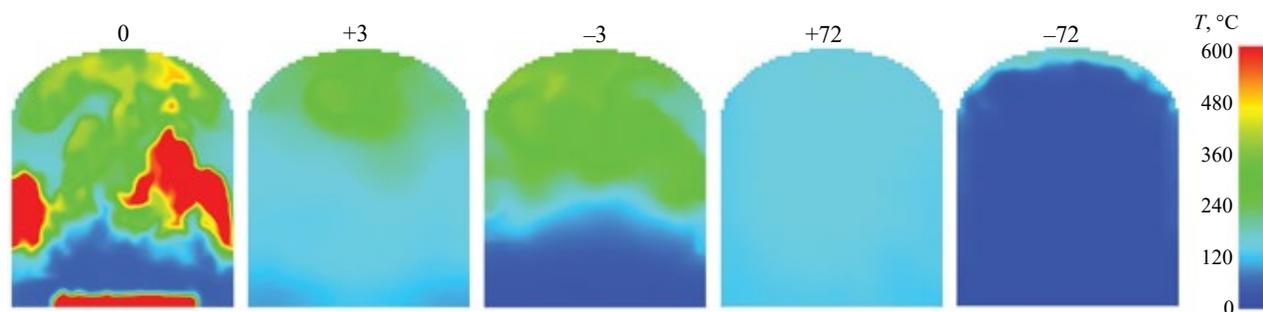


Рис. 4. Поля температуры газовой среды в момент времени 300 с в плоскостях  $Y = 0$  м,  $Y = \pm 3$  м,  $Y = \pm 72$  м  
 Fig. 4. Temperature fields of the gaseous medium at time 300 s in planes  $Y = 0$  m,  $Y = \pm 3$  m,  $Y = \pm 72$  m

температуры, связанные с возникновением направленных газовых потоков через систему вентиляции.

Рост объема зоны высоких температур в верхней части рассматриваемого пространства наблюдается до 150-й с модельного времени, после которого общий вид графиков и полей температуры практически не меняется.

Динамика теплового потока вблизи поверхности ограждений качественно согласуется с колебаниями температуры газа. Максимальная плотность теплового потока у свода ПИЛ составляет более  $15 \text{ кВт/м}^2$ , средняя —  $4,9 \text{ кВт/м}^2$  (рис. 3, б).

Объемная доля кислорода вблизи пламени не достигает на длительное время величин, при которых снижается интенсивность горения. Локальные колебания до значения  $0,15$  моль/моль и ниже, при котором, согласно алгоритмам FDS, происходит подавление горения<sup>8</sup>, не оказывают заметного влияния на мощность пожара  $Q$  (рис. 5).

Глубина заложения комплекса подземных сооружений относительно поверхности обуславливает перепад давления  $P$  и плотности воздуха  $\rho = \rho(T, P)$  с внешней средой ( $\Delta P = 6303 \text{ Па}$ ,  $\Delta \rho = 0,055 \text{ кг/м}^3$ ). Это приводит к образованию газообмена между ПИЛ и атмосферой с начала моделирования, когда изменения температуры еще слабо выражены (рис. 6).

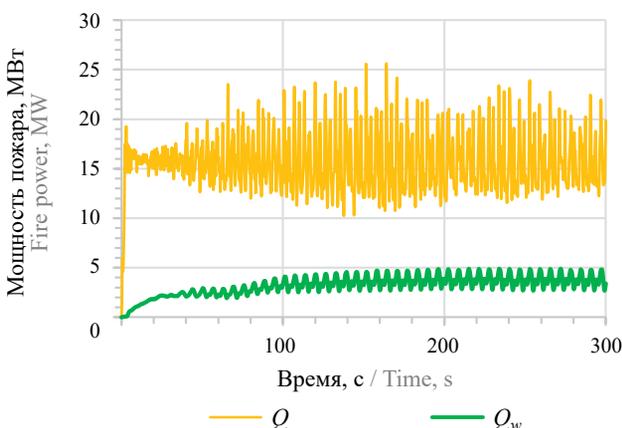


Рис. 5. Временные графики мощности пожара ( $Q$ ) и количества теплоты, поглощенного ограждениями ( $Q_w$ )  
 Fig. 5. Time graphs of fire power ( $Q$ ) and the amount of heat absorbed by the enclosures ( $Q_w$ )

Анализ влияния на температурный режим вариации отдельных характеристик модели и параметров моделирования, приведенных в табл. 1, выявил следующие особенности.

1. Уменьшение относительно базовой модели максимального размера  $a_{\text{max}}$  ячеек расчетной сетки по оси  $Y$  в верхней части пространства ПИЛ и по осям  $X, Y, Z$  — в нижней части до  $a_{\text{max}} = 0,2$  м не оказывает существенного влияния на измеряемые параметры (рис. 7, а).

Увеличение  $a_{\text{max}}$  до  $0,6$  м приводит к значительным отклонениям характеристик в диапазоне времени  $75\text{--}250$  с. После  $250$ -й с временные графики температуры приближаются к полученным на основе базовой модели (рис. 7, а).

В связи с наличием выраженных колебаний температуры для определения среднеквадратических отклонений экспериментальных данных при вариации  $a_{\text{max}}$  относительно базовой модели выполнено их линейное сглаживание по 41-й точке, а также синхронизация по оси абсцисс с использованием линейной интерполяции (рис. 7, б).

Наибольшее абсолютное среднеквадратическое отклонение (метрика  $RMSE$ ) за исключением области пламени отмечается для датчика, расположенного на высоте  $7,2$  м над зоной горения (табл. 2).

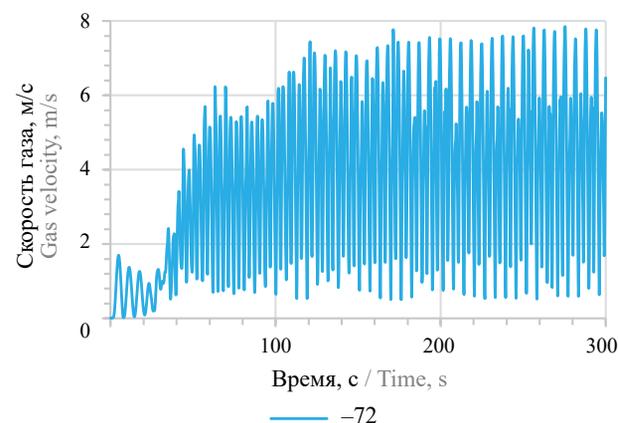
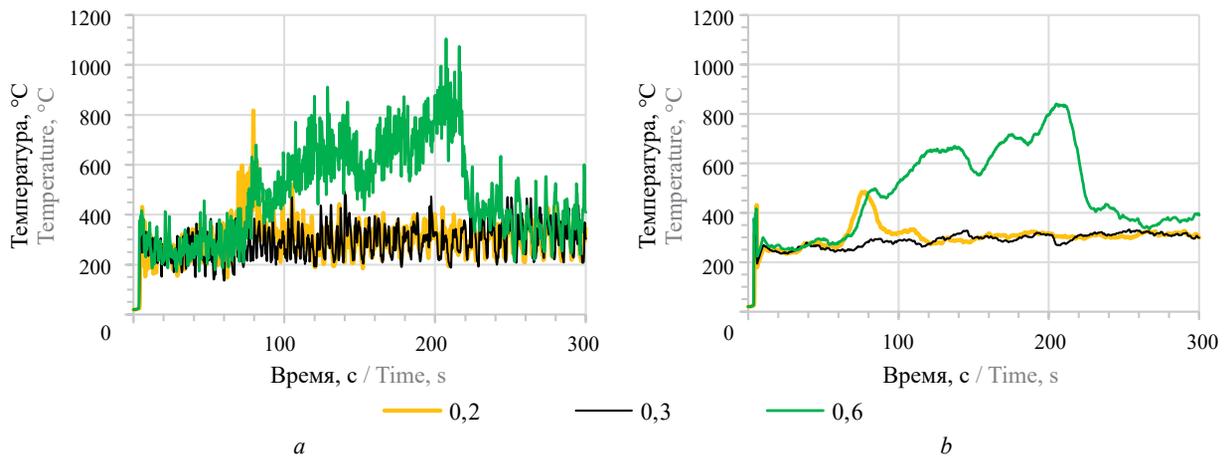


Рис. 6. Временной график нормальной составляющей скорости газа в плоскости  $Y = -72$  м  
 Fig. 6. Time graph of the normal component of gas velocity in the  $Y = -72$  m plane



**Рис. 7.** Временные графики температуры газовой среды на высоте 7,2 м в плоскости  $Y = 0$  м в экспериментах с  $a_{\max} = 0,2$  м,  $a_{\max} = 0,3$  м,  $a_{\max} = 0,6$  м: *a* — исходные; *b* — сглаженные  
**Fig. 7.** Time graphs of the gaseous medium temperature at a height of 7.2 m in the  $Y = 0$  m plane in experiments with  $a_{\max} = 0.2$  m,  $a_{\max} = 0.3$  m,  $a_{\max} = 0.6$  m: *a* — initial; *b* — smoothed

В табл. 2 также представлено изменение расчетного времени в зависимости от размеров ячеек при следующих аппаратных характеристиках компьютера: процессор  $4 \times 3,40$  ГГц, оперативная память 16 Гб. Также в ходе экспериментов установлено, что излишнее уточнение сетки до размеров  $0,1 \times 0,1 \times 0,1$  м во всей расчетной области с целью повышения детализации процессов приводит к непомерной длительности моделирования при имеющихся аппаратных средствах.

В качестве критерия выбора размера ячеек расчетных сеток (табл. 1, 2) использовано отношение  $D^*/a$  характеристического диаметра пожара к размеру ячейки, которое для получения оптимальных точности и скорости моделирования должно принимать значение<sup>6</sup> в интервале от 4 до 16. При этом характеристический диаметр пожара вычисляется по формуле:

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot T \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}},$$

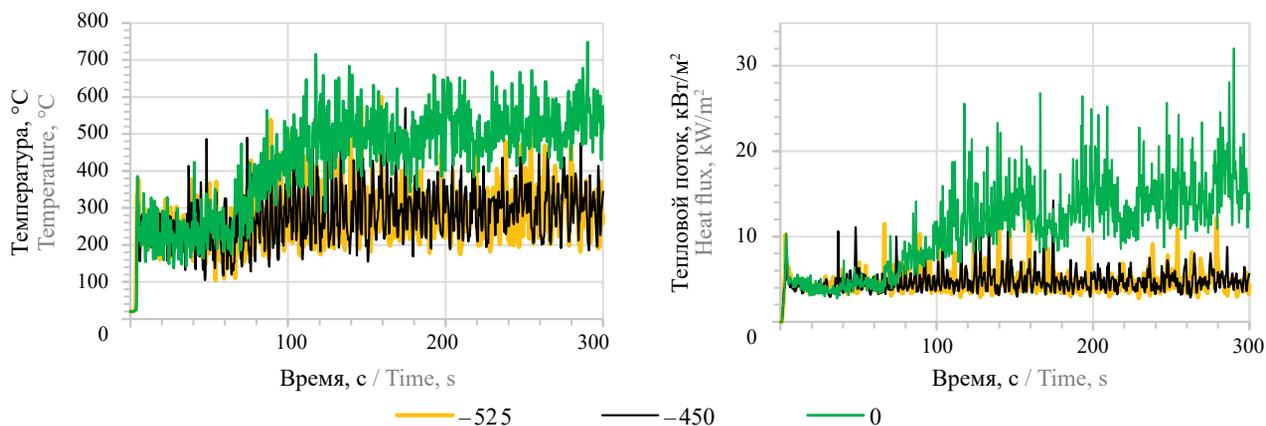
где  $Q$  — мощность пожара, Вт;  
 $\rho$  — плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $C_p$  — теплоемкость воздуха,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  
 $T$  — температура воздуха, К;  
 $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

С учетом указанных выше характеристик горючей нагрузки в базовой модели, определяющих мощность пожара ( $Q = \eta Q_n \psi_{уд} S_r$  [25]), а также начальных свойств воздуха, применяемых при расчете, возможные значения размера ячеек сетки  $a$  лежат в интервале 0,17–0,66 м. Выбранные размеры ячеек сетки 0,1, 0,2, 0,3 и 0,6 м близки к найденному интервалу. Следует отметить, что на данный вывод не влияет вариация плотности воздуха в ПИЛ, имеющей

**Таблица 2.** Время расчета и абсолютные среднеквадратические ошибки расчета температуры относительно базовой модели при вариации максимального размера ячеек расчетной сетки  $a_{\max}$

**Table 2.** Calculation time and absolute root-mean-square errors of temperature calculation relative to the base model with variations in the maximum cell size of the computational grid  $a_{\max}$

$a_{\max}$ , м $a_{\max}$ , m	Число ячеек, ед. Number of cells, un.	Время расчета, ч Calculation time, h	RMSE на высоте 7,2 м, °C RMSE on high 7.2 m, °C								
			Плоскость расположения датчиков Y, м Sensor location plane Y, m								
			0	-3	-12	-42	-72	+3	+12	+42	+72
0,2	2 384 640	90,95	47	40	28	10	10	35	23	12	11
0,3	1 422 720	53,18	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,6	806 400	41,72	255	182	90	39	44	183	100	50	35



**Рис. 8.** Временные графики температуры газовой среды и плотности теплового потока на высоте 6,7 м в плоскости  $Y = 0$  м при  $Z = -525$  м,  $Z = -450$  м,  $Z = 0$  м

**Fig. 8.** Time graphs of the gas medium temperature and heat flux at a height of 6.7 m in the  $Y = 0$  m plane at  $Z = -525$  m,  $Z = -450$  m,  $Z = 0$  m

большее значение относительно внешней среды из-за глубины подземного комплекса.

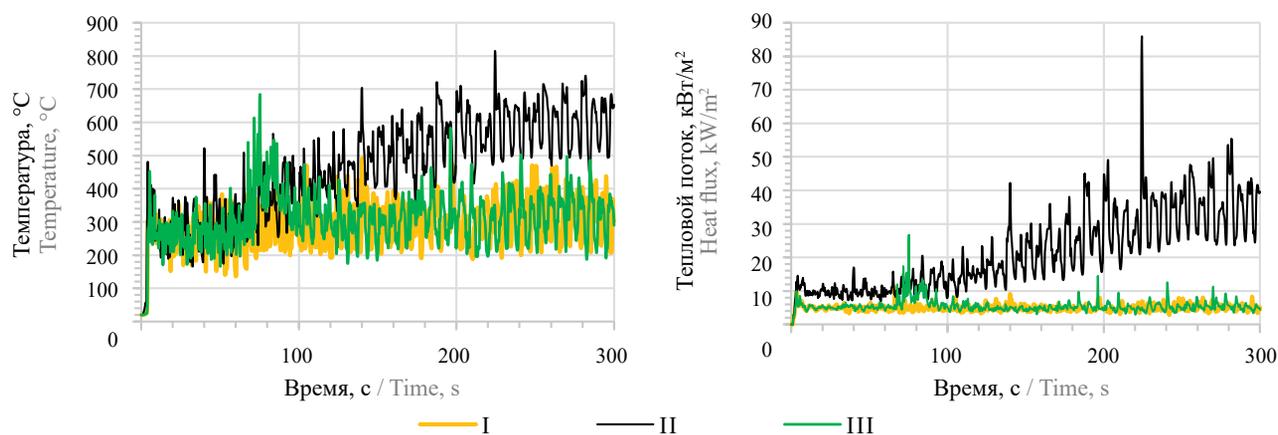
2. При учете в модели заглупления горной выработки относительно поверхности наблюдается различная динамика газообмена ПИЛ с внешней средой, обусловленная перепадом давлений и плотностей воздуха. В сценариях с нижней координатой свободного пространства выработки  $Z = -525$  м и  $Z = -450$  м средние значения скорости движения и массового расхода газа в воздуховоде выше, чем для эксперимента с  $Z = 0$  м, а также отличаются значительной амплитудой колебаний.

Температура газа в данных экспериментах характеризуется существенной неравномерностью как по высоте пространства, так и по его длине — относительно очага пожара. На развитой стадии пожара температуры в припотолочном слое и плотности теплового потока ниже, чем полученные при расположении исследуемого объема вблизи поверхности ( $Z = 0$  м)

(рис. 8). Следует отметить, что различия температур при  $Z = -525$  м и  $Z = -450$  м незначительны.

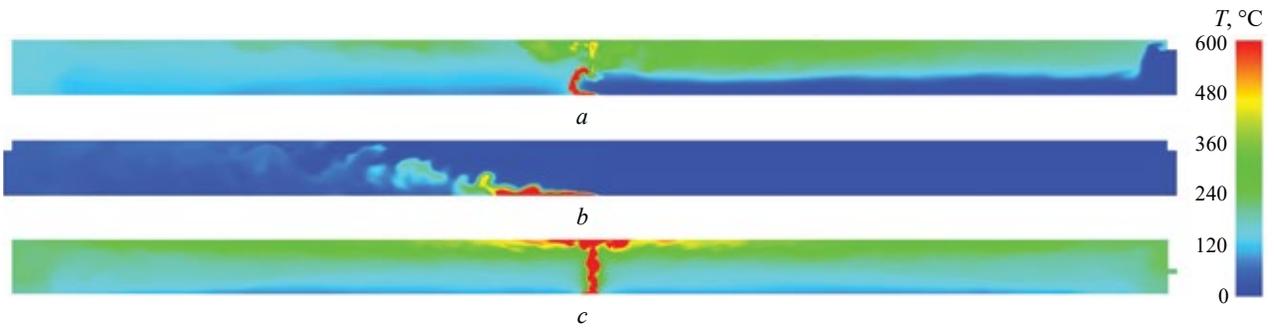
3. При задании в модели поверхности ограждений типа ADIABATIC (поверхность, для которой не учитывается теплообмен с газовой средой) значения температуры и теплового потока существенно возрастают относительно базового эксперимента (рис. 9, II). Таким образом, расход энергии на нагрев ограждений оказывает значительное влияние на температурный режим пожара в ПИЛ. Согласно графику (рис. 5), количество теплоты, поглощаемое ограждениями в единицу времени, составляет до 36 % от скорости тепловыделения.

Задание тепловых свойств горной породы по нижней и верхней границам экспериментальных данных (табл. 1) не приводит к заметному изменению характеристик газовой среды (рис. 9, I, III). В квазистационарном режиме пожара абсолютное отклонение средних значений температуры составляет 11 °C (отно-



**Рис. 9.** Временные графики температуры газовой среды и плотности теплового потока на высоте 7,2 м в плоскости  $Y = 0$  м: I — базовая модель; II — твердые поверхности ADIABATIC; III — твердые поверхности с нижней границей тепловых свойств горной породы

**Fig. 9.** Time graphs of the gas medium temperature and heat flux at a height of 7.2 m in the  $Y = 0$  m: I — basic model; II — ADIABATIC solid surfaces; III — solid surfaces with the lower limit of the thermal properties of the rock



**Рис. 10.** Поля температуры газовой среды в плоскости  $X = 0$  м в момент времени 300 с: *a* — базовая модель; *b* — модель с 2-мя вентиляционными отверстиями; *c* — модель с 1 вентиляционным отверстием минимального размера  
**Fig. 10.** Temperature fields of the gaseous medium in the  $X = 0$  m plane at time 300 s: *a* — basic model; *b* — model with 2 ventilation holes; *c* — model with 1 minimum size ventilation hole

сительное отклонение — 4 %), теплового потока —  $0,32 \text{ кВт/м}^2$  (относительное отклонение — 6 %).

4. Особенности вентиляции обуславливают значительные изменения как температурного режима пожара, так и газообмена внутреннего пространства ПИЛ с внешней средой (рис. 10).

В эксперименте с двумя вентиляционными отверстиями, а также соответствующими парами воздухопроводов, внутренних и внешних узлов системы HVAC, расположенных в торцевых частях модели, образуется тяга в ПИЛ в положительном направлении вдоль оси  $Y$  (рис. 10, *b*), которая характеризуется высокими, относительно базовой модели, величинами скорости движения и массового расхода газа в воздуховодах и поперечном сечении горной выработки. Данное явление приводит к сносу пламени, а также удалению нагретых продуктов горения из пространства ПИЛ во внешнюю среду с такой интенсивностью, что не происходит их скопления в припотолочном объеме и, соответственно, нагрева ограждений. Температура газовой среды в верхней части пространства при развитом пожаре не превышает  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В другой модификации модели задается одно вентиляционное отверстие наименьшей площади (табл. 1), при которой не возникает ошибка моделирования, связанная с неустойчивостью численного решения. В этом эксперименте за время моделирования не наблюдается перехода пожара в квазистационарный режим, из-за малого газообмена с внешней средой происходит накопление тепла в пространстве ПИЛ. Во всех точках измерения фиксируются в среднем более высокие температуры газовой среды (рис. 10, *c*) и плотности теплового потока по сравнению с базовой моделью, которые растут в течение всего времени моделирования. Поля температуры характеризуются симметрией относительно плоскости  $ZOX$ . Следует отметить, что снижения концентрации кислорода в зоне горения менее 15 %, способного привести к уменьшению скорости окислительной реакции и затуханию пламени, в усло-

виях экспериментов не наблюдается даже при ограниченной вентиляции.

5. Увеличение или уменьшение площади горения в указанных пределах (табл. 1) приводит к существенному изменению температуры по всей длине припотолочной зоны ПИЛ. Наибольшие отклонения от результатов базового эксперимента фиксируются при  $S_r = 17,28 \text{ м}^2$  датчиками, расположенными над зоной горения, и составляют для средних значений температур на высоте 6,7 м в квазистационарном режиме пожара:  $256 \text{ }^\circ\text{C}$  (в плоскости  $Y = 0$  м),  $241 \text{ }^\circ\text{C}$  (в плоскости  $Y = -3$  м),  $261 \text{ }^\circ\text{C}$  (в плоскости  $Y = +3$  м). Соответствующие отклонения при  $S_r = 4,32 \text{ м}^2$ :  $104 \text{ }^\circ\text{C}$  (в плоскости  $Y = 0$  м),  $125 \text{ }^\circ\text{C}$  (в плоскости  $Y = -3$  м),  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  (в плоскости  $Y = +3$  м).

## Выводы

Результаты, полученные в ходе компьютерных экспериментов, в целом согласуются с данными других исследований в области моделирования пожаров в тоннельных сооружениях с использованием CFD [3–7, 9, 10, 13–17, 21–23]. В частности:

- увеличение размеров ячеек расчетной сетки не оказывает весомого влияния на точность определения характеристик температурного режима пожара на развитой его стадии при условии соблюдения требований к максимальному размеру ячейки, при этом значительно сокращается время расчета [4, 13, 15, 21]. Поскольку результаты базового эксперимента близки к полученным при более точной сетке, то сетка с размерами ячеек  $a_{\text{max}} = 0,3$  м может считаться адекватной относительно целей исследования. Следствием увеличения  $a_{\text{max}}$  до 0,6 м является значительное отклонение характеристик в интервале времени 75–250 с. Учитывая рекомендации разработчика FDS избегать использования сеток, линейные размеры ячеек которых отличаются более чем в 3 раза, а также тот факт, что при  $a_{\text{max}} = 0,6$  м не наблюдается существенного прироста произ-

водительности вычислений (табл. 2), в рамках исследования следует считать нецелесообразным применение подобной модификации модели;

- схема вентиляции оказывает значительное влияние на динамику пожара [7, 13, 17, 21, 23]. Сокращение или отсутствие отвода продуктов горения в атмосферу обуславливает наихудшие условия с точки зрения температурного воздействия на ограждения. Результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что особенности вентиляции и газообмена с внешней средой являются одним из основных факторов, которые необходимо учитывать при создании модели с целью получения достоверного прогноза температур газовой среды при пожаре в ПИЛ;
- при моделировании необходимо учитывать теплоотвод ограждениями, который существенно влияет на температуру газовой среды [5, 9, 10]. Несмотря на то что в случае вариации теплофизических параметров горной породы в экспериментально определенных пределах [1] исследуемые характеристики соизмеримы, с точки зрения необходимости анализа последствий пожара при наихудших условиях целесообразно при настройке модели указывать нижние границы теплоемкости, теплопроводности и плотности твердых поверхностей, при которых энергия, поглощаемая горной породой, будет минимальна, и, следовательно, температура газовой среды — максимальна.

Следует отметить ряд особенностей, которые были установлены в результате анализа пожара на исследуемом объекте при заданных условиях эксперимента:

- координаты пространства относительно поверхности оказывают влияние на газообмен ПИЛ с внешней средой, а также значения и объемное распределение температур газовой среды;

- полученные зависимости температур отличаются от стандартного температурного режима, создаваемого при испытаниях строительных конструкций на огнестойкость<sup>10</sup>;
- наиболее интенсивное тепловое воздействие на ограждения наблюдается в припотолочном слое газа непосредственно над зоной горения при ограниченной вентиляции;
- снижения концентрации кислорода в зоне горения до величины, оказывающей влияние на мощность пожара, не возникает.

Таким образом, поскольку подземный комплекс, включающий ПИЛ, является уникальным сооружением, компьютерные модели, позволяющие прогнозировать развитие пожара в тоннеле, должны быть адаптированы с учетом характеристик объекта.

Разработанная компьютерная модель ПИЛ, принимая во внимание выявленные особенности, может быть использована для проверки на основе численных экспериментов эффективности систем противопожарной защиты на объекте, анализа динамики пожара при различных условиях вентиляции, а также моделирования прогрева ограждений как при свободном развитии пожара, так и при воздействии на них огнетушащих веществ.

Данные, которые получены в результате исследования пожара в ПИЛ, позволяют обоснованно задать диапазоны изменения температурных показателей среды при проведении огневых испытаний образцов горных пород, составляющих ограждения сооружений подземного комплекса.

<sup>10</sup> ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования // Консультант-Плюс : сайт. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_287370/fb6746a7db73abb486f778631939798e0f344d33/#](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_287370/fb6746a7db73abb486f778631939798e0f344d33/#) (дата обращения: 01.03.2024).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Озерский Д.А., Орлова А.И.* Анализ прочностных характеристик горной породы для обоснования безопасности строительства подземных сооружений ПИЛ // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 70–76. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-70-76
2. *Агеев П.М., Шарпов С.В., Голиков А.Д.* Расчет основных параметров пожара подвижного состава в тоннеле метрополитена // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2011. № 4. С. 67–75.
3. *Болодьян И.А., Пузач С.В., Барановский А.С.* Применение численного моделирования для оценки влияния продольного уклона в автотранспортном тоннеле на распространение опасных факторов пожара // Пожарная безопасность. 2021. № 4 (105). С. 31–39. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2021.95.98.003
4. *Болодьян И.А., Пузач С.В., Барановский А.С.* Численное моделирование пожара в автодорожном тоннеле. Выбор расчетной сетки // Пожарная безопасность. 2021. № 3 (104). С. 47–54. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2021.72.64.005
5. *Ворогушин О.О., Корольченко А.Я., Ляпин А.В.* Расчет температурного режима пожара при определении пределов огнестойкости строительных конструкций в зданиях, расположенных над транспортными магистралями // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 4. С. 33–37.
6. *Данилов А.И., Сиваков И.А., Пилипенко Н.В., Петров А.В., Костерева П.А.* Моделирование пожара пассажирского поезда в железнодорожном тоннеле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 340–347. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-340-347

7. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Сушкина Е.Ю. Развитие экспериментальных исследований пожарной опасности автотранспортных тоннелей // Пожарная безопасность. 2013. № 4. С. 87–92.
8. Лугин И.В., Алферова Е.Л. Тепломассообменные процессы при горении поезда в однопутном тоннеле метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 7. С. 324–332.
9. Мельничук С.Ф., Голиков А.Д. Компьютерное моделирование пожара в тоннеле : мат. Всеросс. межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Ч. IV. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. С. 116–117.
10. Таранцев А.А., Кондратьев С.А., Рузманов М.Д., Химчук Д.В. Программное моделирование для решения задач по обеспечению пожарной безопасности в тоннелях // Военный инженер. 2022. № 1 (23). С. 57–63.
11. Романченко С.Б., Чистяков А.В., Буторин С.Н. Компьютерное моделирование аварийных вентиляционных режимов транспортных тоннелей и метрополитенов // Пожарная безопасность. 2015. № 4. С. 158–166.
12. Садыгов А.Б. Моделирование движения воздушных потоков в подземных сооружениях метрополитена при пожаре // Электронная обработка материалов. 2012. Т. 48. № 2. С. 118–125.
13. Blanchard E., Boulet P., Desanghere S., Cesmat E., Meyrand R., Garo J.P. et al. Experimental and numerical study of fire in a midscale test tunnel // Fire Safety Journal. 2012. Vol. 47. Pp. 18–31. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.09.009
14. Chow W.K. Simulation of tunnel fires using a zone model // Tunnelling and Underground Space Technology. 1996. Vol. 11. No. 2. Pp. 221–236.
15. Colella F., Rein G., Verda V., Borchiellini R. Multiscale modeling of transient flows from fire and ventilation in long tunnels // Computers & Fluids. 2011. Vol. 51. No. 1. Pp. 16–29. DOI: 10.1016/j.compfluid.2011.06.021
16. Jain S., Kumar Sh., Kumar S., Sharma T.P. Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions // Tunnelling and Underground Space Technology. 2008. Vol. 23. No. 2. Pp. 160–170. DOI: 10.1016/j.tust.2007.04.004
17. Lanchava O., Ilias N., Radu S.M., Makharadze L., Kunchulia T., Arudashvili N. et al. Analysis of the parameters of the fire modeled in a road tunnel // Georgian Scientists. 2020. Vol. 2. No. 4. DOI: 10.52340/g.s.02.09.235
18. Li H., Zhu W., Tang M., Shi C., Tang F. Burning characteristic and ceiling temperature of moving fires in a tunnel: A comparative study // Tunnelling and Underground Space Technology. 2024. Vol. 145. P. 105571. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105571
19. Pozharkova I.N. Features of modeling the combustion processes of flammable liquids with high ignition temperature in FDS software // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2020. Vol. 1679. No. 2. P. 022048. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022048
20. Takeuchi S., Aoki T., Tanaka F., Moimuddin K.A. Modeling for predicting the temperature distribution of smoke during a fire in an underground road tunnel with vertical shafts // Fire Safety Journal. 2017. Vol. 91. Pp. 312–319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.063
21. Fernandez-Alaiz F., Castanon A.M., Gomez-Fernandez F., Bascompta M. Mine fire behavior under different ventilation conditions: Real-scale tests and CFD modeling // Applied sciences. 2020. Vol. 10. No. 10. P. 3380. DOI: 10.3390/app10103380
22. Verda V., Borchiellini R., Cosentino S., Guelpa E., Tuni J.M. Expanding the FDS simulation capabilities to fire tunnel scenarios through a novel multi-scale model // Fire Technology. 2021. Vol. 57. Pp. 2491–2514. DOI: 10.1007/s10694-020-01081-y
23. Niu H.Y., Qiao C.L., An J.Y., Deng J. Experimental study and numerical simulation of spread law for fire on tunnel // Journal of Central South University. 2015. Vol. 22. No. 2. Pp. 701–706. DOI: 10.1007/s11771-015-2573-z
24. Пожаркова И.Н. Анализ задач и методов математического моделирования пожаров в тоннельных сооружениях // Инженерный вестник Дона. 2024. № 5 (113). С. 1–15.
25. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : уч. пос. М. : Академия ГПС МВД России, 2005. 118 с.
26. Кукин П.П. и др. Теория горения и взрыва / под ред. П.П. Кукина, В.В. Юшина, С.Г. Емельянова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во Юрайт, 2017. 346 с.

## REFERENCES

1. Ozersky D.A., Orlova A.I. Strength characteristics of rock and their analysis in the construction safety assessment of underground URF structures. *Radioactive waste*. 2023; 1(22):70-76. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-70-76 (rus).
2. Ageev P.M., Sharapov S.V., Golikov A.D. Calculation of key parameters of the fire of the rolling stock in the underground tunnel. *Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia"*. 2011; 4:67-75. (rus).
3. Bolodyan I.A., Puzach S.V., Baranovsky A.S. Application of numerical modeling to assess the influence of the longitudinal slope in a road tunnel on the fire hazards spread. *Fire Safety*. 2021; 4(105):31-39. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.95.98.003 (rus).

4. Bolodyan I.A., Puzach S.V., Baranovsky A.S. Numerical modeling of fire in a road tunnel. Selection of calculation grid. *Fire Safety*. 2021; 3(104):47-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.72.64.005 (rus).
5. Vorogushin O.O., Korolchenko A.Ya., Lyapin A.V. Calculation of a temperature mode of fire at determination of fire resistance limits of construction designs in buildings, located over transport highways. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(4):33-37. (rus).
6. Danilov A.I., Sivakov I.A., Pilipenko N.V., Petrov A.V., Kostereva P.A. Modeling a passenger train fire in a railway tunnel. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2017; 17(2):340-347. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-340-347 (rus).
7. Kopylov N.P., Khasanov R.R., Sushkina E.Yu. Development of experimental research in fire hazard of motor transport tunnels. *Fire Safety*. 2013; 4:87-92. (rus).
8. Lugin I.V., Alferova E.L. Heat and mass transfer processes during train combustion in a single-track metro tunnel. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 7:324-332 (rus).
9. Melnichuk S.F., Golikov A.D. Computer modeling of a fire in a tunnel. *Materials of the All-Russian Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduate Students. Part IV*. 2008; 116-117. (rus).
10. Tarantsev A.A., Kondratyev S.A., Ruzmanov M.D., Khimchuk D.V. Software modeling for solving problems of ensuring fire safety in tunnels. *Military Engineer*. 2022; 1(23):57-63. (rus).
11. Romanchenko S.B., Chistyakov A.V., Butorin S.N. Computer simulation of emergency ventilation conditions for traffic tunnels and underground subways. *Fire Safety*. 2015; 4:158-166. (rus).
12. Sadygov A.B. Modeling the movement of air flows in underground structures of the metro during a fire. *Electronic Processing of Materials*. 2012; 48(2):118-125. (rus).
13. Blanchard E., Boulet P., Desanghere S., Cesmat E., Meyrand R., Garo J.P. et al. Experimental and numerical study of fire in a midscale test tunnel. *Fire Safety Journal*. 2012; 47:18-31. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.09.009
14. Chow W.K. Simulation of tunnel fires using a zone model. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1996; 11(2):221-236.
15. Colella F., Rein G., Verda V., Borchiellini R. Multiscale modeling of transient flows from fire and ventilation in long tunnels. *Computers & Fluids*. 2011; 51(1):16-29. DOI: 10.1016/j.compfluid.2011.06.021
16. Jain S., Kumar Sh., Kumar S., Sharma T.P. Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2008; 23(2):160-170. DOI: 10.1016/j.tust.2007.04.004
17. Lanchava O., Ilias N., Radu S.M., Makharadze L., Kunchulia T., Arudashvili N. et al. Analysis of the parameters of the fire modeled in a road tunnel. *Georgian Scientists*. 2020; 2(4). DOI: 10.52340/g.s.02.09.235
18. Li H., Zhu W., Tang M., Shi C., Tang F. Burning characteristic and ceiling temperature of moving fires in a tunnel: A comparative study. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024; 145:105571. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105571
19. Pozharkova I.N. Features of modeling the combustion processes of flammable liquids with high ignition temperature in FDS software. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1679(2):022048. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022048
20. Takeuchi S., Aoki T., Tanaka F., Moinuddin K.A. Modeling for predicting the temperature distribution of smoke during a fire in an underground road tunnel with vertical shafts. *Fire Safety Journal*. 2017; 91:312-319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.063
21. Fernandez-Alaiz Fernandez-Alaiz F., Castanon A.M., Gomez-Fernandez F., Bascompta M. Mine fire behavior under different ventilation conditions: Real-scale tests and CFD modeling. *Applied Sciences*. 2020; 10(10):3380. DOI: 10.3390/app10103380
22. Verda V., Borchiellini R., Cosentino S., Guelpa E., Tuni J.M. Expanding the FDS simulation capabilities to fire tunnel scenarios through a novel multi-scale model. *Fire Technology*. 2021; 57:2491-2514. DOI: 10.1007/s10694-020-01081-y
23. Niu H.Y., Qiao C.L., An J.Y., Deng J. Experimental study and numerical simulation of spread law for fire on tunnel. *Journal of Central South University*. 2015; 22(2):701-706. DOI: 10.1007/s11771-015-2573-z
24. Pozharkova I.N. Analysis of problems and methods for mathematical modeling of fires in tunnel structures. *Engineering Journal of Don*. 2024; 5(113):1-15. (rus).
25. Koshmarov Yu.A. Forecasting hazardous factors of indoor fire : a textbook. *State Fire Academy EMERCOM of Russia*. 2005; 118. (rus).
26. Kukin P.P. et al. *Theory of combustion and explosion* . V.V. Yushina, S.G. Emelyanova et al. (Ed.). Yurayt Publishing House, 2017; 346. (rus).

Поступила 09.04.2024, после доработки 27.05.2024;

принята к публикации 13.06.2024

Received April 9, 2024; Received in revised form May 27, 2024;

Accepted June 13, 2024

**Информация об авторе**

**ПОЖАРКОВА Ирина Николаевна**, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики, Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, улица Северная, 1; доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, проспект Свободный, 79; РИНЦ ID: 501137; ResearcherID: A-7628-2015; ORCID: 0000-0003-1153-350X; e-mail: [pozharkova@mail.ru](mailto:pozharkova@mail.ru)

**Information about the author**

**Irina N. POZHARKOVA**, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Professor of Department of Technical Examinations and Criminalistics, Siberian Fire and Rescue Academy of Emercom of Russia, Severnaya St., 1, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, 662972, Russian Federation; Associate Professor of Department of Automation, Automated Control and Design Systems, Siberian Federal University, Svobodniy Avenue, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ID RSCI: 501137; ResearcherID: A-7628-2015; ORCID: 0000-0003-1153-350X; e-mail: [pozharkova@mail.ru](mailto:pozharkova@mail.ru)