

УДК 004.942; 614.841

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-65-70

**Численное моделирование процессов в газовой среде
при пожаре в подземной исследовательской лаборатории**

**Numerical modeling of processes in a gaseous environment
during a fire in an underground research laboratory**

И. Н. Пожаркова, Т. А. Литвинская, Е. Ю. Трояк
*Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Железнодорожск, Российская Федерация*

I. N. Pozharkova, T. A. Litvinskaya, E. Yu. Troyak
*Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry
of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation*

Аннотация. В статье рассмотрены особенности численного моделирования с использованием программы Fire Dynamics Simulator процессов, происходящих в газовой среде при пожаре в подземной исследовательской лаборатории. Описана специфика создания расчетной модели, ее характеристики. Результаты исследования процессов в газовой среде на базе построенной модели показали, что глубина заложения подземного сооружения, оказывает значительное влияние на динамику тепломассообмена при пожаре на объекте. Наличие вентиляционного отверстия обеспечивает возможность газообмена между внутренним пространством лаборатории и внешней средой, что создает условия для перехода пожара в квазистационарный режим и стабилизации параметров газовой среды. Максимальная температура газа достигает 600 °C в припотолочной зоне подземной исследовательской лаборатории. Объемная доля кислорода не снижается до значений, необходимых для самопроизвольного прекращения горения. Сделан вывод, что интенсивный газообмен с внешней средой, наблюдающийся с момента начала моделирования, обусловлен наличием перепадов давления и плотности воздуха из-за глубины заложения сооружения. Данную гипотезу подтвердили дополнительные численные эксперименты, проведенные при модификации модели, включающей задание различных нижних координат свободного пространства.

Ключевые слова: численное моделирование, FDS, CFD, пожар, подземное сооружение глубокого заложения, газовая среда, динамика пожара, подземная исследовательская лаборатория

Abstract. The article considers the features of numerical modeling using the Fire Dynamics Simulator program of processes occurring in a gas environment during a fire in an underground research laboratory. The specifics of creating a computational model and its characteristics are described. The results of studying processes in a gas environment based on the constructed model showed that the depth of the underground structure has a significant effect on the dynamics of heat and mass transfer during a fire at the facility. The presence of a ventilation hole provides the possibility of gas exchange between the interior of the laboratory and the external environment, which creates conditions for the transition of the fire to a quasi-stationary mode and stabilization of the parameters of the gas environment. The maximum gas temperature reaches 600 °C in the ceiling zone of the underground research laboratory. The volume fraction of oxygen does not decrease to the values required for spontaneous combustion termination. It is concluded that the intense gas exchange with the external environment, observed from the start of the modeling, is due to the presence of pressure drops and air density due to the depth of the structure. This hypothesis was confirmed by additional numerical experiments conducted when modifying the model, including the specification of various lower coordinates of free space.

Keywords: numerical modeling, FDS, CFD, fire, deep-laid underground structure, gas environment, fire dynamics, underground research laboratory

Введение

Современные тенденции в строительстве включают увеличение количества проектируемых и вводимых в эксплуатацию подземных сооружений. Такой подход является эффективным способом решения проблем городов, связанных с перегрузкой поверхностной застройки территории, и позволяет рационально использовать подземное пространство [1].

Подземные сооружения глубокого заложения представляют собой уникальные объекты, которые выполняют различные функции в зависимости от их назначения. Они могут применяться как для размещения объектов промышленности, инфраструктуры (метро, подземные парковки, склады и хранилища), так и в качестве научных лабораторий, культурных и развлекательных комплексов и т.д. Подобные подземные сооружения строятся на значительной глубине, которая может достигать сотни метров под поверхностью земли [2].

Подземные сооружения глубокого заложения, как и любые другие объекты, обладают своими преимуществами, но также имеют недостатки. Один из наиболее значимых аспектов, требующих особого внимания, заключается в том, что возникновение пожара в таких сооружениях может привести к серьезным последствиям. Это связано с рядом факторов, влияющих на протекание процессов в газовой среде при пожаре, которые имеют отличительные особенности по сравнению с обычными условиями в зданиях, расположенных на поверхности. Во-первых, затруднена естественная вентиляция, что может привести к быстрому снижению видимости и интенсивному распространению токсичных продуктов горения, что, в свою очередь, ухудшает условия эвакуации людей. Во-вторых, из-за повышенной температуры возникает опасность обрушения конструкций.

Более подробно изучить протекание процессов при пожаре в подземном сооружении глубокого заложения позволяет численное моделирование [3, 4], так как проведение натурных экспериментов на указанном типе объектов, зачастую, не представляется возможным.

В настоящее время реализуется строительство подземной исследовательской лаборатории объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов (далее – ПИЛ) в Нижне-Канском скальном массиве на территории Красноярского края [5]. ПИЛ включает горизонтальные горные выработки, расположенные на глубине 450–525 м, соединенные между собой и с поверхностью системой вертикальных стволов и скважин. Длина горизонтального прямолинейного участка выработки значительно превышает размеры поперечного сечения [5]. По геометрическим характеристикам выработки наиболее близки к тоннельным сооружениям со сводчатой формой верхней части и вертикальными стенками (см. рис. 1).

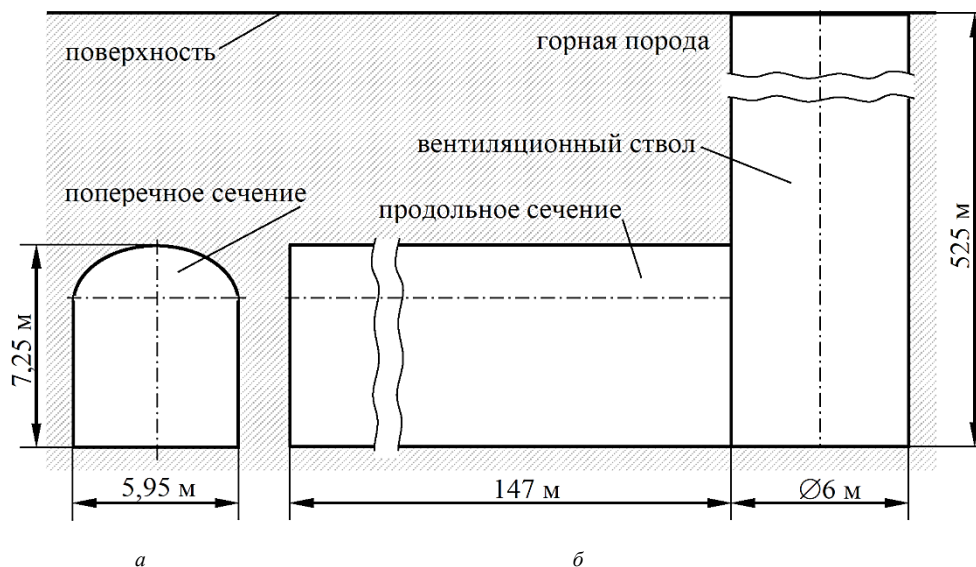


Рис. 1. Ориентировочные проектные размеры горной выработки ПИЛ:
а – поперечное сечение; б – продольное сечение [4]

Для численного моделирования процессов в газовой среде при пожарах в подобных сооружениях широко применяется программа Fire Dynamics Simulator (FDS) [3, 4], которая реализует методы вычислительной гидродинамики (CFD) для описания тепломассопереноса при горении [6]. Это позволяет спрогнозировать динамику развития пожара, распределение температур и концентраций газов в рассматриваемом пространстве, а также оценить тепловое воздействие на конструкции. FDS также позволяет моделировать распространение пламени и горение материалов, что даёт возможность исследовать, как пламя распространяется по поверхности и как оно взаимодействует с окружающей средой.

Теория

В рамках исследования, результаты которого описаны в данном материале, создание трехмерной модели ПИЛ, ввод исходных данных и визуализация результатов моделирования выполнялись на базе программного комплекса Pyrosim, который является оболочкой, реализующей графический интерфейс ядра FDS.

Для подробного изучения протекания процессов в газовой среде при пожаре в ПИЛ с учетом глубины заложения сооружения были построены три расчетные модели: базовая и две ее модификации, отличающиеся нижней координатой свободного пространства.

Построение трехмерной модели включало задание ее геометрических характеристик близкими к ориентировочным проектным размерам ПИЛ, в т.ч. воссоздание арочной формы свода тоннельного сооружения (рис. 1). При этом необходимо было учесть дискретизацию пространства, реализуемую в FDS ортогональными сетками [6]. Согласно рекомендациям разработчиков FDS, количество ячеек сетки в каждом направлении целесообразно принимать кратным $2^l 3^m 5^n$, где l , m и n – целые числа. Таким образом, общее количество ячеек сетки в расчетной модели сооружения составило 1422720. Нижняя координата свободного пространства в базовой модели составляет -525 м, что соответствует глубине заложения горизонтальной горной выработки [5].

Характеристики базовой модели ПИЛ представлены в табл. 1 и 2, а также в табл. 3 перечислены используемые при моделировании измерительные элементы и их расположение. На рис. 2 приведен общий вид модели ПИЛ.

Таблица 1

Размер ячеек сетки расчетной модели пил по осям X, Y, Z

Расположение сетки на модели горизонтальной выработки ПИЛ	Размер ячеек сетки, м		
	X	Y	Z
Зона горения	0,1	0,1	0,1
Нижняя часть модели	0,3	0,3	0,3
Верхняя часть модели	0,1	0,3	0,1

Таблица 2

Параметры базовой модели пил

Параметры ограждающих конструкций [3]					
Толщина, м	Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	Теплопроводность, Вт/м·К	Плотность, кг/м³		
0,6	732	2,7	2285		
Параметры вентиляционного отверстия и поверхности горения					
	Вентиляционное отверстие	Поверхность горения			
Расположение	Торцевая часть выработки	Центр основания выработки			
Диаметр, м	6				
Площадь, м²		8,64			
Параметры горючей нагрузки (индустриальное масло) [3]					
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Удельная скорость выгорания, кг/м²·с	Дымообразующая способность, Нп·м²/кг	Удельное потребление кислорода, кг/кг		
42,7	0,043	480,0	–1,589		
Удельное выделение углекислого газа, кг/кг	Удельное выделение угарного газа, кг/кг	Удельное выделение хлороводорода, кг/кг			
1,070	0,122	0			
Условия при моделировании		Толщина слоя жидкости не допускает выгорание вещества за все время моделирования			
		Начальная температура жидкости превышает температуру воспламенения			
Параметры окружающей среды					
Температура воздуха, °С	Давление, Па	Массовая доля кислорода, кг/кг	Плотность воздуха, кг/м³	Теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К)	Относительная влажность воздуха, %
20	101325	0,232378	1,2041	1005	40

Таблица 3

Типы измерительных элементов

Плоскости для построения полей температуры газовой среды и парциальной плотности кислорода (см. рис. 2, в)		
Расположение плоскостей для построения полей	Направление сечения	
	Продольное	Поперечное
В вертикальных сечениях, м (смещение от геометрического центра свободного пространства)	0; -1,8; -2,4	0; ±3; ±12; ±42; ±72
В горизонтальных сечениях, м (смещение от нижней координаты свободного пространства)	+0,6; +3,0; +6,7; +7,2	

Устройства измерения локальных значений параметров газовой среды				
Наименование датчиков	Температура	Тепловой поток	Парциальная плотность кислорода	Объемная концентрация кислорода
Расположение в вертикальных поперечных сечениях модели, м	0; ±3; ±12; ±42; ±72 от геометрического центра свободного пространства модели (см. рис. 2, а, б)			
Устройства измерения локальных значений скорости движения параметров газовой среды				
Наименование параметра устройства измерения скорости движения	Газовая среда	Давление	Плотность	Скорость и массовый расход газа в воздуховоде
Расположение устройства измерения, м	0; ±3; ±12; ±42; ±72 вдоль оси Y (от геометрического центра свободного пространства)			

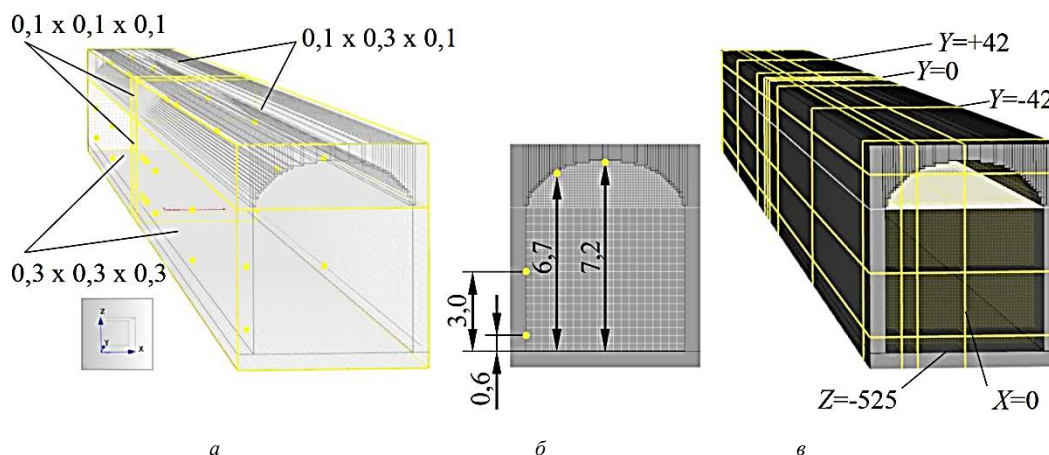


Рис. 2. Модель горизонтальной выработки ПИЛ:
а – ячейки сетки и измерительные датчики; б – расположение измерительных датчиков (м);
в – расположение измерительных плоскостей (м) [3]

Результаты

Анализ полученных результатов моделирования пожара на основе базовой модели ПИЛ показал:

1. Согласно временным графикам температуры газовой среды (рис. 3, а, б) в квазистационарном режиме пожара (после 150 с модельного времени) ее среднее значение составило 305 °С, максимальная температура в припотолочном слое газа над очагом пожара (высота расположения датчика – 6,7 м, 7,2 м) превысила 600 °С, температура в очаге пожара (датчик, расположенный на высоте 3,0 м) достигла 1000 °С.

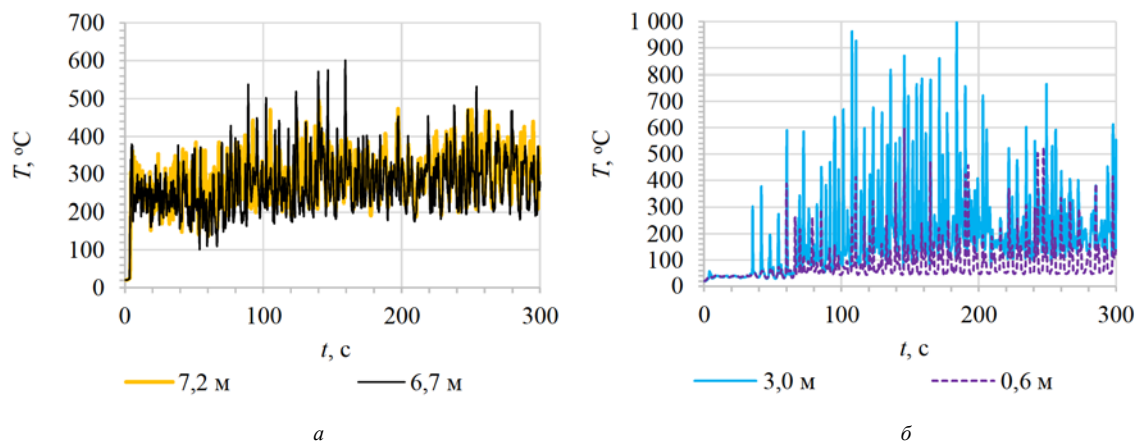


Рис. 3. Временные графики температуры газовой среды T в плоскости $Y = 0$ м:
а – на высоте 7,2 м, 6,7 м; б – на высоте 3,0 м, 0,6 м

2. Не наблюдается затухания пожара вследствие недостатка кислорода, т.к. его объемная доля X_{O_2} не снижается на длительный промежуток времени до значения менее 0,15 моль/моль (рис. 4), необходимого для подавления горения согласно алгоритмам FDS [6].

Анализ временного графика мощности пожара, подтверждает вышесказанное. Временное понижение X_{O_2} не влияет на величину Q , которая в среднем составляет 20 МВт за весь период моделирования (рис. 5).

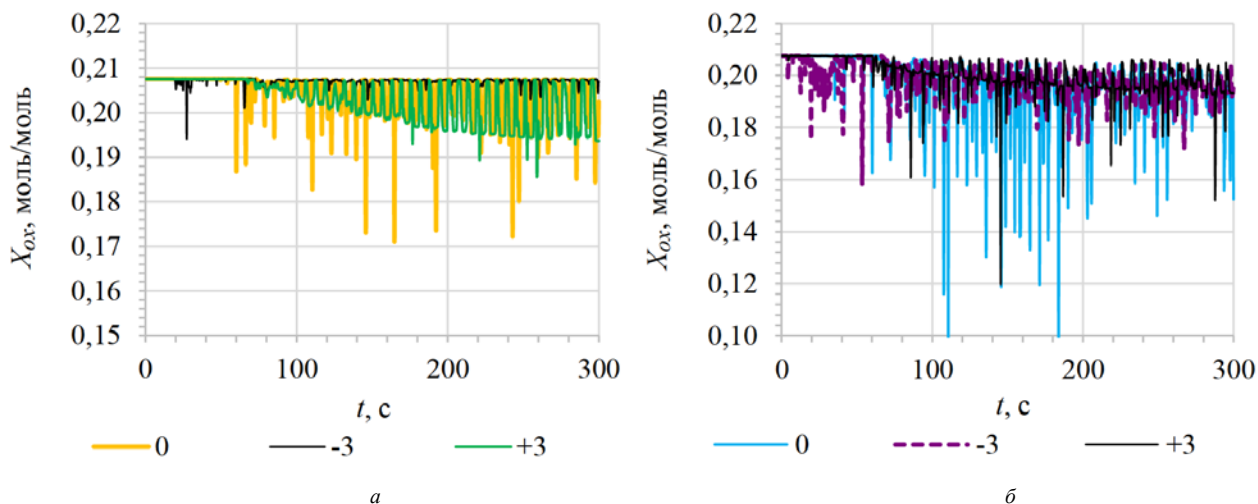


Рис. 4. Временные графики объемной доли кислорода X_{O_2} в плоскостях $Y = 0$ м, $Y = \pm 3$ м:
а – на высоте 0,6 м; б – на высоте 3,0 м

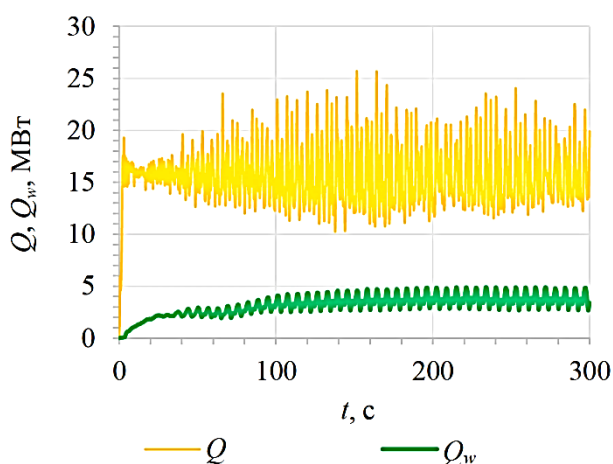


Рис. 5. Временные графики мощности пожара (Q) и количества теплоты, поглощенного ограждениями (Q_w)

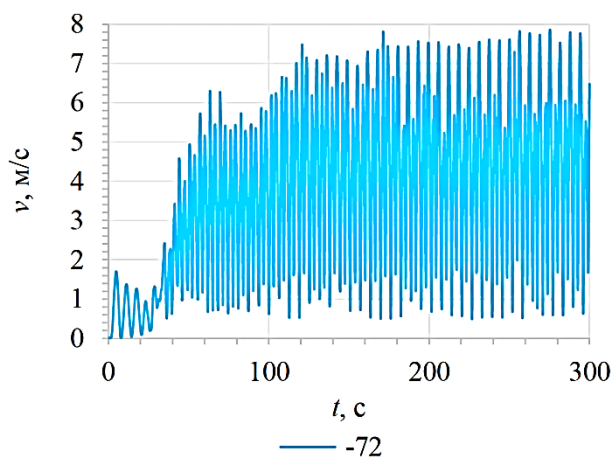


Рис. 6. Временной график нормальной составляющей скорости газа v в плоскости $Y = -72$ м

3. Временной график нормальной составляющей скорости газа v (рис. 6) показывает, что с момента начала моделирования пожара происходит интенсивный газообмен между внутренним пространством ПИЛ и внешней средой, что доказывает влияние на процессы глубины заложения сооружения относительно поверхности. Это обусловлено перепадом давления и плотности воздуха, которые равны 6303 Па и 0,055 кг/м³, соответственно. Значение массового расхода в поперечном сечении воздуховода в среднем составляет 4,61 м³/с (рис. 6).

Для сравнения были проведены исследования с использованием модификаций базовой модели, включающих задание нижней координаты свободного пространства Z равной -450 м и 0 м. Анализ влияния вариации данной характеристики модели, выявил следующую особенность – глубина заложения подземного сооружения существенно влияет на динамику газообмена и температурный режим при пожаре в ПИЛ.

Сценарии с $Z = -525$ м (базовая модель) и $Z = -450$ м, показали более высокие значения скорости движения и массового расхода газа в воздуховоде относительно сценария, где $Z = 0$ м. Температура газа в данных экспериментах характеризуется существенной неравномерностью как по высоте пространства, так и по его

длине – относительно очага пожара (рис. 7). На развитой стадии пожара температуры в припотолочном слое газа ниже, чем полученные при расположении исследуемого объема вблизи поверхности ($Z = 0$ м). Следует отметить, что различия температур при $Z = -525$ м и $Z = -450$ м незначительны [3].

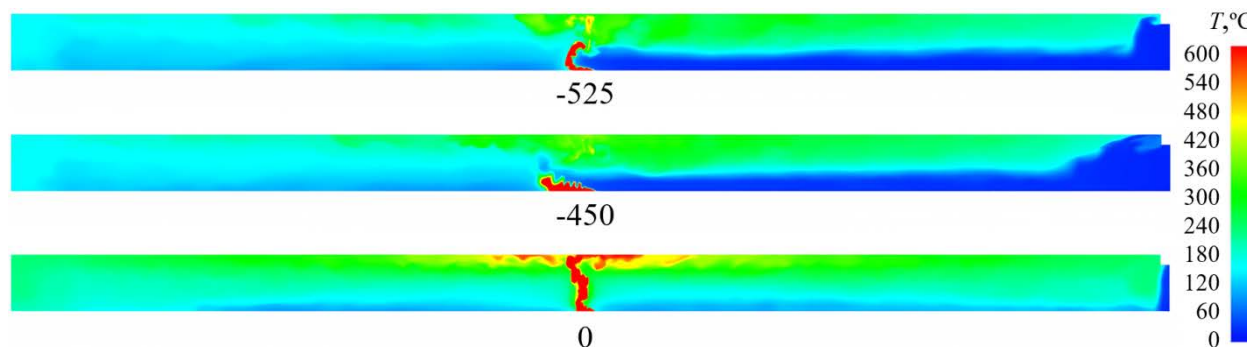


Рис. 7. Поля температуры газовой среды в плоскости $X = 0$ м при $Z = -525$ м, $Z = -450$ м, $Z = 0$ м в момент времени 300 с

Выводы и заключение

Таким образом, по результатам численного моделирования можно сделать вывод, что в подземных сооружениях глубокого заложения протекают уникальные процессы в газовой среде при пожаре, отличные от происходящих в зданиях на поверхности и являющихся широко исследованными.

Описанная базовая модель ПИЛ может быть модифицирована и использована для исследования влияния на динамику пожара в сооружении: размера ячеек сетки, теплофизических свойств поверхности, особенностей вентиляции, площади и пожароопасных свойств горючей нагрузки.

Список источников

1. Ишин А. В. Анализ проблем современных городов и возможностей их решения с использованием подземного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S6. С. 107–112. EDN LACGGT.
2. Чунюк Д. Ю., Сельвиан С. М. Подземные сооружения промышленного и гражданского назначения. М. : Изд-во МИСИ МГСУ, 2022. 44 с.
3. Пожаркова И. Н. Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33, № 4. С. 22–35.
4. Пожаркова И. Н. Технология оценки прогрева горной породы при пожаре в подземной исследовательской лаборатории // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12, № 9. С. 71–83. EDN CZMEMY.
5. 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.norao.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf (дата обращения: 15.01.2025).
6. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 2: Verification / K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott [et al.] / National Institute of Standards and Technology, Technical Research Centre of Finland. NIST Special Publication 1018-2, 2013.