

Технология оценки прогрева горной породы при пожаре в подземной исследовательской лаборатории

И. Н. Пожаркова

Аннотация—Статья посвящена математическому моделированию процессов при пожаре в подземной исследовательской лаборатории объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов. Рассмотрены методы расчета теплопереноса в твердых телах, которые используются в исследованиях, посвященных анализу устойчивости тоннельных сооружений при пожаре. Построена функциональная диаграмма оценки на основе численного моделирования прогрева горной породы, ограждающей подземную исследовательскую лабораторию. Выявлены значимые с точки зрения решаемой задачи входные параметры, характеризующие, с одной стороны, геометрические, теплофизические, пожароопасные свойства исследуемого объекта, с другой стороны – специфические настройки среды моделирования. Описан процесс создания модели подземной исследовательской лаборатории в формате FDS, указаны значения настроечных параметров, дано обоснование применяемых инструментов. Представлены измерительные элементы, использующиеся для сохранения в процессе расчета оцениваемых физических величин и обеспечения возможности последующей визуализации результатов моделирования в соответствии с выходами функциональной диаграммы. Приведены результаты моделирования пожара в подземной исследовательской лаборатории для различных сценариев его развития. Установлены диапазоны изменения параметров газовой среды, плотности теплового потока и температуры на поверхности ограждений, температуры внутри твердых тел при варьировании: вида горючей нагрузки, тепловых свойств горной породы, начальной температуры. Сформулированы перспективы применения представленной технологии, включая обоснованное задание условий проведения огневых испытаний образцов горной породы, проверку эффективности систем противопожарной защиты на объекте, настройку нейросетевых моделей.

Ключевые слова—моделирование пожара, теплоперенос, FDS, тоннель, горная выработка, тепловое воздействие, ограждения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проектируемый в рамках создания единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами комплекс подземных сооружений включает подземную исследовательскую лабораторию (ПИЛ), предназначенную для изучения характеристик и свойств геологических пород и подтверждения возможности

окончательной изоляции в Нижне-Канском горном массиве высоко- и среднеактивных долгоживущих радиоактивных отходов [1]. ПИЛ оборудуется в горных выработках со сводчатой формой верхней части, расположенных на целевой глубине 450–525 м относительно поверхности (рис. 1). Горные породы представлены архейскими гнейсами глубоких геологических формаций.



Рис. 1. Ориентировочные проектные размеры горной выработки ПИЛ

После ввода объекта в эксплуатацию горная порода, составляющая основание и ограждения ПИЛ, подвержена нагреву как в номинальных режимах технологического процесса, осуществляемого в лаборатории и связанного с теплообменом в системе «отходы – инженерные барьеры – геологическая среда», так и в аварийных режимах, в частности, при пожаре в ПИЛ. Высокие температуры, воздействующие на гнейсы, потенциально способны привести их разрушению и потере несущей способности ограждений.

Представляет интерес исследование теплообменных процессов в массиве горной породы при температурных воздействиях, которые могут наблюдаться при пожаре в лаборатории.

Поскольку геометрические размеры горной выработки ПИЛ имеют существенную разницу в продольном и поперечном сечениях (рис. 1), температурная кривая стандартного пожара, а также упрощенные аналитические соотношения не позволяют предсказать возможные диапазоны температур газовой среды, воздействующие на локальные области поверхности ограждений на всем ее протяжении [2]. Динамика прогрева горной породы может быть оценена на основе математического моделирования совокупности взаимосвязанных процессов,

Статья получена 7 июня 2024.

И. Н. Пожаркова, ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск; ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, г. Красноярск (e-mail: pozharkova@mail.ru).

сопровождаящих развитие пожара в ПИЛ: тепловыделения в зоне горения, нагрева газовой среды, формирования турбулентных газовых течений, теплоотвода в ограждения и др., описываемых, в общем случае, системой дифференциальных уравнений [3].

Для автоматизированного решения подобных задач в настоящее время используются пакеты прикладных программ на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD), включающие набор инструментов для предварительной обработки модели (создание геометрии рассматриваемого объекта, дискретизация объема газовой и твердой среды, задание начальных и граничных условий), расчета тепломассообмена при пожаре на основе численного решения системы дифференциальных уравнений, визуализации полученных решений в табличной и графической форме.

Целью исследования, результаты которого представлены в настоящей статье, является разработка технологии оценки прогрева горной породы на основе математического моделирования пожара в ПИЛ.

II. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Поскольку проектируемый комплекс подземных сооружений, включающий ПИЛ, является уникальным объектом, при анализе научных публикаций, затрагивающих вопрос потери несущей способности ограждающих конструкций при пожаре, в первую очередь рассматривались исследования объектов со сходной геометрией – тоннельных сооружений транспортной инфраструктуры: автотранспортных [4–7] и железнодорожных [8–12] тоннелей, тоннелей метрополитена [13, 14]. Следует отметить крайне малое количество работ, посвященных математическому моделированию прогрева ограждений при пожарах в горных выработках и шахтах (в частности, [15, 16]).

Направления исследований можно разделить на следующие группы:

- расчет на основе аналитических или численных методов процессов теплопереноса в ограждающих конструкциях при известной температуре газовой среды [6, 9, 10, 12–14]. При таком расчете сначала строится температурная кривая газа вблизи ограждений, подвергающихся тепловому воздействию, затем оценивается распределение температуры внутри твердого материала;

- расчет теплового потока, температуры газовой среды, температуры на поверхности ограждений, позволяющий осуществить сравнение с критическими значениями соответствующих величин для известного материала конструкции [4, 5, 8];

- синхронный расчет параметров газовой среды и температуры внутри твердых поверхностей с учетом динамики горения и особенностей геометрии объекта [7, 11]. Подобное вычисление на каждом шаге моделирования температурных характеристик позволяет учесть зависимость температуры газа от интенсивности теплоотвода в ограждения.

Протяженность горной выработки ПИЛ обуславливает значительную разницу между площадью ее основания и возможной площадью очага пожара. Очевидно, это приведет к существенной неравномерности нагрева горной породы. Следовательно, именно последний подход позволит получить наиболее точную оценку площади и глубины прогрева горной породы при пожаре в ПИЛ.

Общим недостатком рассмотренных исследований с точки зрения решаемой задачи является отсутствие анализа чувствительности результатов моделирования к таким факторам как: глубина заложения тоннеля, его форма, начальная температура газовой среды и поверхности ограждений, многослойность материала конструкций (например: основание, штукатурка, финишное покрытие, огнезащита), наличие армирующих элементов.

III. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе [2] изложены результаты исследования температурного режима в горизонтальной горной выработке ПИЛ на основе моделирования процессов горения в программе FDS с учетом глубины заложения, особенностей вентиляции, размера ячеек сетки, геометрических параметров ПИЛ, характеристик горючей нагрузки, теплофизических свойств горной породы. Установлено, что существенное влияние на значения температуры газа вблизи ограждений оказывают: интенсивность газообмена с внешней средой, нижняя координата свободного пространства ПИЛ, а также площадь горения.

С опорой на проведенное ранее исследование [2], технологию оценки прогрева горной породы, ограждающей ПИЛ, на основе математического моделирования пожара с использованием программы FDS и ее пользовательского интерфейса Pyrosim можно представить в виде функциональной диаграммы в нотации IDEF0 [17], приведенной на рис. 2.

Входами функциональной диаграммы являются физические величины, характеризующие, с одной стороны, геометрические, теплофизические, пожароопасные и др. свойства исследуемого объекта, с другой стороны – специфические настройки среды моделирования.

Выходы диаграммы – совокупность данных, характеризующих динамику прогрева горной породы, в табличной, графической форме, а также в виде двумерных и трехмерных полей температуры ограждений ПИЛ.

Механизмы функциональной диаграммы описывают программное обеспечение (Pyrosim, FDS, Smokeview, Excel), применяющееся для решения соответствующих задач, включая предварительную подготовку данных, численный расчет и постобработку полученных результатов.

Управление включает математические модели и алгоритмы для расчета динамики процессов тепломассообмена при пожаре.

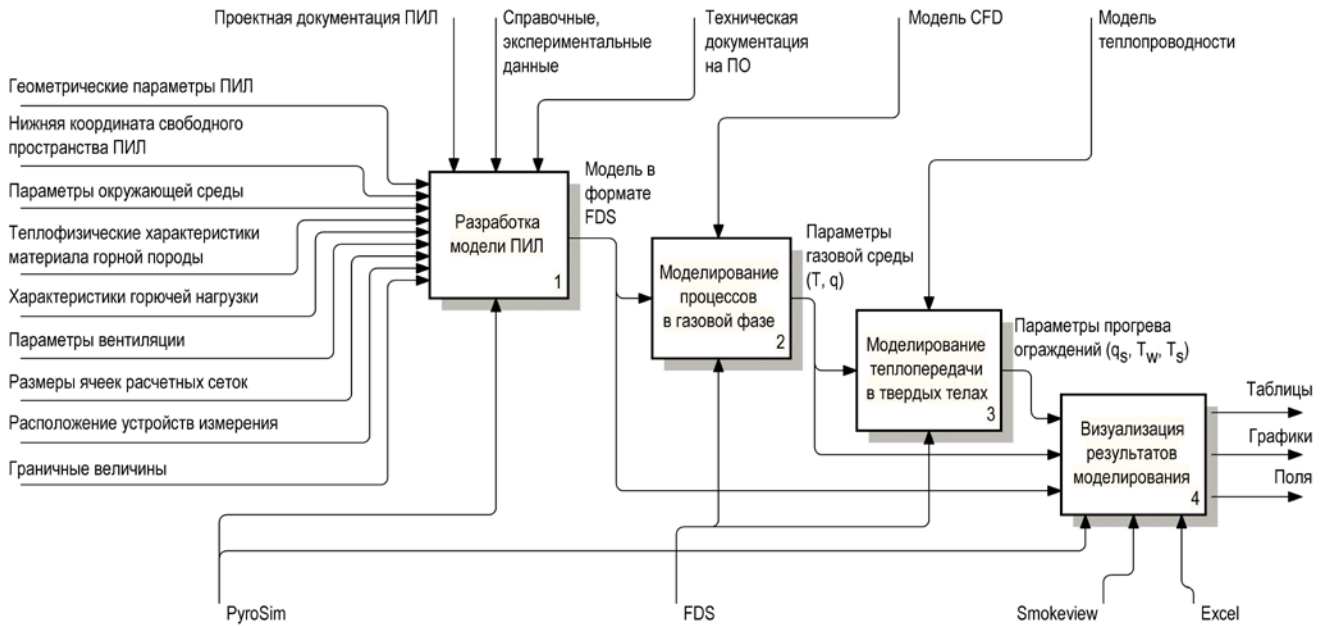


Рис. 2. Функциональная диаграмма оценки прогрева горной породы, ограждающей ПИЛ, на основе численного моделирования

Основой для расчета в программе FDS тепломассопереноса в газовой среде является CFD-модель, базирующая на численном решении системы уравнений газодинамики потоков в частных производных, а именно уравнений: сохранения массы, сохранения импульса, сохранения энергии, состояния. Детализация процессов, точность и устойчивость численного решения зависят от характеристик расчетных сеток, в каждой ячейке которых рассчитываются параметры газовой среды на текущем шаге моделирования [3].

Также, в программе FDS реализована возможность расчета прогрева твердых тел на основе численного решения одномерного уравнения теплопроводности, составленного для каждой граничной ячейки сетки между газовой средой и твердой поверхностью. Теплопроводность предполагается только в одном направлении – нормальном к поверхности. При этом учитываются усредненные тепловые свойства тела: удельная теплоемкость c_s , теплопроводность k_s , а также плотность ρ_s [3]:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + q'_s,$$

где $T_s(x, t)$ – температура твердого тела на расстоянии x от поверхности в момент времени t ;

q'_s – мощность внутреннего источника теплоты.

Для вычисления температуры поверхности ограждения $T_w(t) = T_s(0, t)$ уравнение преобразуется к виду:

$$-k_s \frac{\partial T_w}{\partial x} = q_s = q_c + q_r,$$

где T_w – температура поверхности твердого тела;

q_s – плотность результирующего (полного) теплового потока, направленного на твердую поверхность, включающего конвективную q_c и лучистую q_r составляющие.

Таким образом, расчет прогрева твердой поверхности

в FDS возможен на каждом шаге моделирования, синхронно с вычислениями плотностей тепловых потоков, которые в свою очередь зависят от: ε – коэффициента излучения поверхности твердого тела; σ – постоянной Стефана-Больцмана; h – коэффициента теплопередачи; T – температуры газа в центре ближайшей к поверхности ячейки сетки [3].

Моделирование динамики процессов при горении в ПИЛ в соответствии с функциональной диаграммой (рис. 2) позволяет учесть вариативность входных параметров и, соответственно, исследовать чувствительность результатов моделирования к их значениям. Для этого проводится однофакторный эксперимент, где в каждой серии опытов для определенного диапазона дискретных значений одного из входов модели сохраняются в файл тепловые параметры газовой среды и ограждений, полученные в результате численного моделирования.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

В программе Pyrosim построена базовая модель ПИЛ (рис. 3), свойства элементов которой соответствуют входам функциональной диаграммы:

1. Расчетные сетки 1–6 (рис. 3) имеют размеры, указанные в табл. 1, обеспечивающие, согласно [2], оптимальную точность и длительность расчета: мелкие – в окрестности очага пожара и в верхней части пространства (для более точного моделирования турбулентных вихрей и имитации сводчатой формы ПИЛ); грубые – на удалении более 1,8 м от границ очага пожара (для ускорения вычисления). Выбор размера ячеек сетки основан на соотношении характеристического диаметра пожара и размера ячейки [2, 3, 18]. Количество ячеек в каждой расчетной сетке для эффективного применения быстрого преобразования Фурье при решении уравнения Пуассона в соответствии с [3] выбрано кратным $2^l 3^m 5^n$, где l, m, n – целые числа (табл. 1). Общее количество ячеек составляет 1422720.

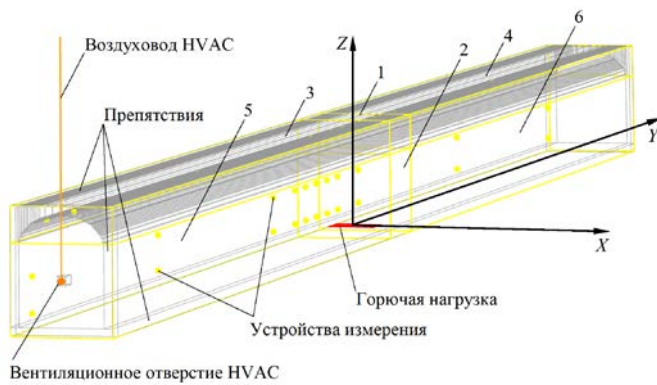


Рис. 3. Модель горизонтальной горной выработки ПИЛ

Таблица 1 — Параметры расчетных сеток

Номер сетки	Количество ячеек, ед.	Размеры ячеек, м		
		по оси X	по оси Y	по оси Z
1	103680	0,1	0,1	0,1
2	259200	0,1	0,1	0,1
3, 4	414720	0,1	0,3	0,1
5, 6	115200	0,3	0,3	0,3

2. Элементы «Препятствия» (рис. 3) ограничивают свободное пространство горной выработки, таким образом, чтобы оно соответствовало размерам, указанным в [1]. Учитывая дискретность возможных геометрических характеристик, обусловленную размерами ячеек сетки, использованы следующие габариты модели ПИЛ, которые отличаются от проектных не более чем на 0,84 %: длина 147,6 м, ширина 6 м, высота 7,2 м.

Поскольку в FDS пространство модели представляется ортогональными сетками, при изображении изогнутых объектов, таких как сводчатая форма горной выработки, использованы препятствия, составленные из отдельных прямоугольных параллелепипедов (рис. 3). Подобная поверхность с выступающими углами может изменять форму и направление турбулентных пристеночных течений газа, что способно повлиять на расчетные значения температуры внутри горной породы. Этим фактором обоснован выбор размеров ячеек сетки, описанный в п. 1.

3. Для имитации тепловых свойств горной породы в Pyrosim создан материал «Гнейс» с теплофизическими параметрами, соответствующими экспериментально полученным для образцов керна, отобранных из скважин [1, 19], а также поверхность типа «Многослойный», которая состоит из указанного материала и присвоена элементам «Препятствие», ограждающим свободное пространство ПИЛ.

4. Модель имеет нижнюю координату свободного пространства -525 м для имитации соответствующего заглубления ПИЛ относительно поверхности [1, 2].

5. Параметры окружающей среды приняты задаваемыми в Pyrosim по умолчанию [20]. Также проведен дополнительный эксперимент по исследованию влияния на динамику прогресса начальной температуры горной породы, которая отличается от

базового значения (20 °С).

6. В качестве горючей нагрузки (рис. 3), показатели пожарной опасности которой задаются в свойствах элементов модели «Реакция», «Поверхность» и «Вентиляционное отверстие», рамках исследования выбраны следующие вещества и материалы, присутствующие на объекте: промышленное масло, поливинилхлорид, резина, древесина. Площадь горючей нагрузки для всех сценариев пожара составляет 8,64 м², характеристики горения указаны в соответствии с [21].

7. Согласно проведенному ранее исследованию [2], наиболее высокие значения температуры наблюдаются при пожаре в ПИЛ в условиях ограниченной вентиляции. С позиции исследования тепловых воздействий на горную породу в наиболее неблагоприятных условиях в модели указана минимальная площадь сечения вентиляционного отверстия и воздуховода (0,2826 м²), при которой сохраняется устойчивость численного решения [3]. Элементы, связывающие пространство ПИЛ с окружающей средой, расположены в торцевой части модели (рис. 3) и реализованы на базе системы HVAC [20].

8. В модель добавлены ряд измерительных элементов [20] для сохранения в процессе расчета оцениваемых физических величин и обеспечения возможности последующей визуализации результатов моделирования в соответствии с выходами функциональной диаграммы (рис. 3):

а) устройства «Измеритель в твердой фазе» (рис. 3) – для фиксации на заданных расстояниях от очага пожара температуры на поверхности и внутри твердого тела (в данном случае – горной породы), а также значений плотности полного теплового потока, ее конвективной и лучистой составляющих. В свойствах элемента указывается положение и глубина соответствующего датчика, относительно поверхности твердого тела. Используются следующие комбинации глубины x для групп датчиков, расположенных в различных точках: 0 м (температура на поверхности горной породы); 0,001 м; 0,01 м; 0,05 м; 0,1 м; 0,2 м; 0,5 м. По оси Y датчики имеют координаты: 0 м; ±3 м; ±6 м; ±12 м; ±42 м; ±72 м. По оси Z датчики расположены на высоте: +0,6 м; +3 м; +6,7 м; +7,2 м относительно основания. Массив температур на каждом шаге моделирования сохраняется в файле *ИМЯ_devc.csv и может быть представлен в виде временного графика встроенными средствами Pyrosim или обработан в табличном процессоре, например Excel.

б) выходные данные для граничных величин «Температура стены» и «Полный тепловой поток» – с целью визуализации тепловых воздействий на горную породу в виде трехмерных полей, а также плоскости для отображения двухмерных полей температуры газа в сечениях $X=0$ и $Y=0$, $Y=±3$, $Y=±6$, $Y=±12$, $Y=±42$, $Y=±72$;

в) устройства «Измеритель в газовой фазе» – для измерения локальных значений температуры газовой среды и плотности теплового потока в точках, расположенных вблизи ограждений на расстояниях: 0 м;

± 3 м; ± 6 м; ± 12 м; ± 42 м; ± 72 м от центра ПИЛ.

г) устройства «Датчик для воздуховода HVAC» – для сохранения значений скорости и расхода газа в воздуховоде.

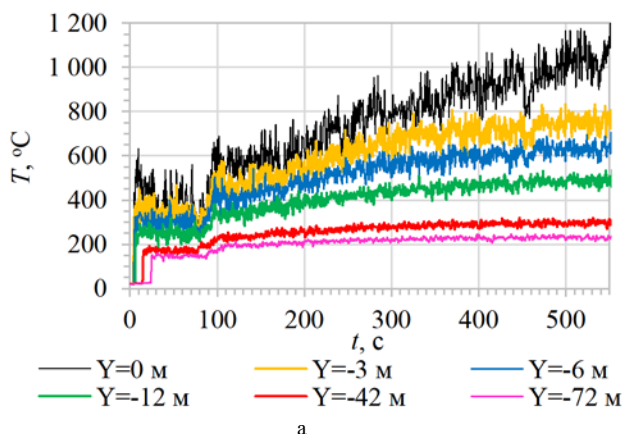
Поскольку модель является симметричной относительно продольной вертикальной оси, с целью сокращения расчетного времени и объема сохраняемых данных для измерений применялись группы устройств, расположенные только в одной половине модели ПИЛ (рис. 3).

Помимо перечисленных параметров встроенными средствами FDS в файл *ИМЯ_hgr.csv автоматически сохраняются величины, характеризующие топливно-энергетический баланс, в частности, энергия, поглощенная ограждениями на текущий момент моделирования [18].

V. ОБСУЖДЕНИЕ

С целью отладки предложенной технологии оценки прогрева горной породы (рис. 2) выполнено моделирование пожара в ПИЛ для различных сценариев его развития. Массивы сохраненных данных для измерителей в твердой и газовой фазе имеют размерность 1000×452 , для полей – пропорциональны количеству ячеек сетки в соответствующем сечении или поверхности.

В результате численного расчета в программе FDS и постобработки полученных данных в программе Microsoft Excel построены графики температуры газовой среды, плотности теплового потока и температуры на поверхности ограждений, температуры внутри горной породы, представленные на рис. 4–7. Приведенные характеристики получены при следующих (базовых) условиях эксперимента:



- начальная температура газовой среды и горной породы 20 °С;

- теплофизические параметры гнейсовых горных пород: теплоемкость $c_s = 710$ Дж/кг·К, теплопроводность $\lambda_s = 2,37$ Вт/м·К, плотность $\rho_s = 2500$ кг/м³ (минимальные значения экспериментальных данных, полученных при исследовании образцов керна [1, 19]), коэффициент излучения $\varepsilon = 0,45$;

- горячая нагрузка – индустриальное масло [2];

- расчет температуры на поверхности и внутри горной породы осуществляется на каждом шаге моделирования, синхронно с вычислениями тепловых параметров газовой среды.

Поскольку исследование носит оценочный характер, в силу ограниченности вычислительных ресурсов, время моделирования составляет 550 с, что соответствует около 112,3 физических часов расчета при следующих аппаратных характеристиках компьютера: процессор $4 \times 3,40$ ГГц, оперативная память 16 ГБ. При этом отсутствуют принципиальные ограничения модели по расчету процесса для более длительного интервала времени.

Температура газовой среды T в различных областях пространства ПИЛ за время моделирования не достигает установившегося значения (рис. 4). Наибольшие значения температуры газа (1175 °С) наблюдаются у свода горной выработки (датчик на высоте 7,2 м) в области, расположенной непосредственно над зоной горения (рис. 4, а). Температуры в нижней части ПИЛ, фиксируемые датчиками, расположенными на высоте 0,6 м и 3 м не превышают 300 °С (рис. 4, б).

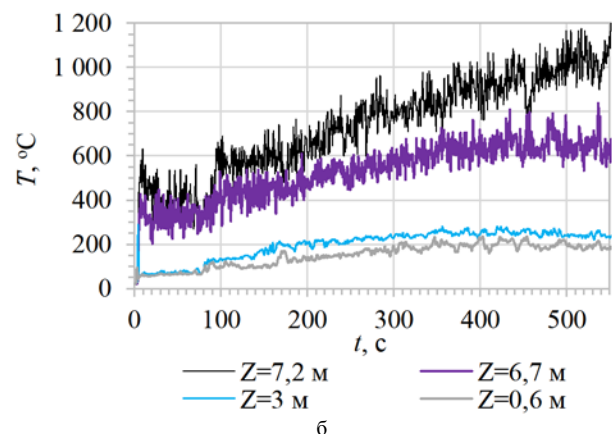


Рис. 4. Временные графики температуры газовой среды T : а – в плоскости $Z=7,2$; б – в плоскости $Y=0$

Аналогичные соотношения наблюдаются и для плотности теплового потока от газа q вблизи ограждений (рис. 5, а).

Плотность полного теплового потока q_s на поверхности горной породы на начальном этапе моделирования имеет наибольшие значения (29 кВт/м²) в зоне теплового воздействия, находящейся в нижней части ПИЛ в непосредственной близости от области горения (датчик на высоте 0,6 м) (рис. 5, б). По мере накопления тепла у свода ПИЛ, максимальная плотность фиксируется датчиком, расположенным на высоте 7,2 м

и достигает 91 кВт/м² (рис. 5, б, в). Плотность конвективного теплового потока q_c в плоскости $Y=0$ составляет около 3 % от полного, лучистого q_r – 97 % (рис. 5, г).

Температура поверхности T_w свода выработки за время моделирования достигает 591 °С (рис. 6, а, б). Ограждающая горная порода в верхней части ПИЛ прогревается на глубину не более 0,2 м (рис. 6, в, г). При этом наиболее существенный нагрев в диапазоне $T_s = 60$ – 536 °С фиксируется датчиками, расположенными на глубине от 0,05 м до 0,001 м.

Из анализа двухмерных полей температуры газовой среды T (рис. 7, а), трехмерных полей температуры ограждений T_w (рис. 7, б) и плотности полного теплового потока q_s (рис. 7, в), следует, что зона

интенсивного теплового воздействия (более $500\text{ }^\circ\text{C}$) на поверхности в рассмотренный период моделирования ограничивается областью, удаленной от границ очага пожара не более, чем на ± 20 м.

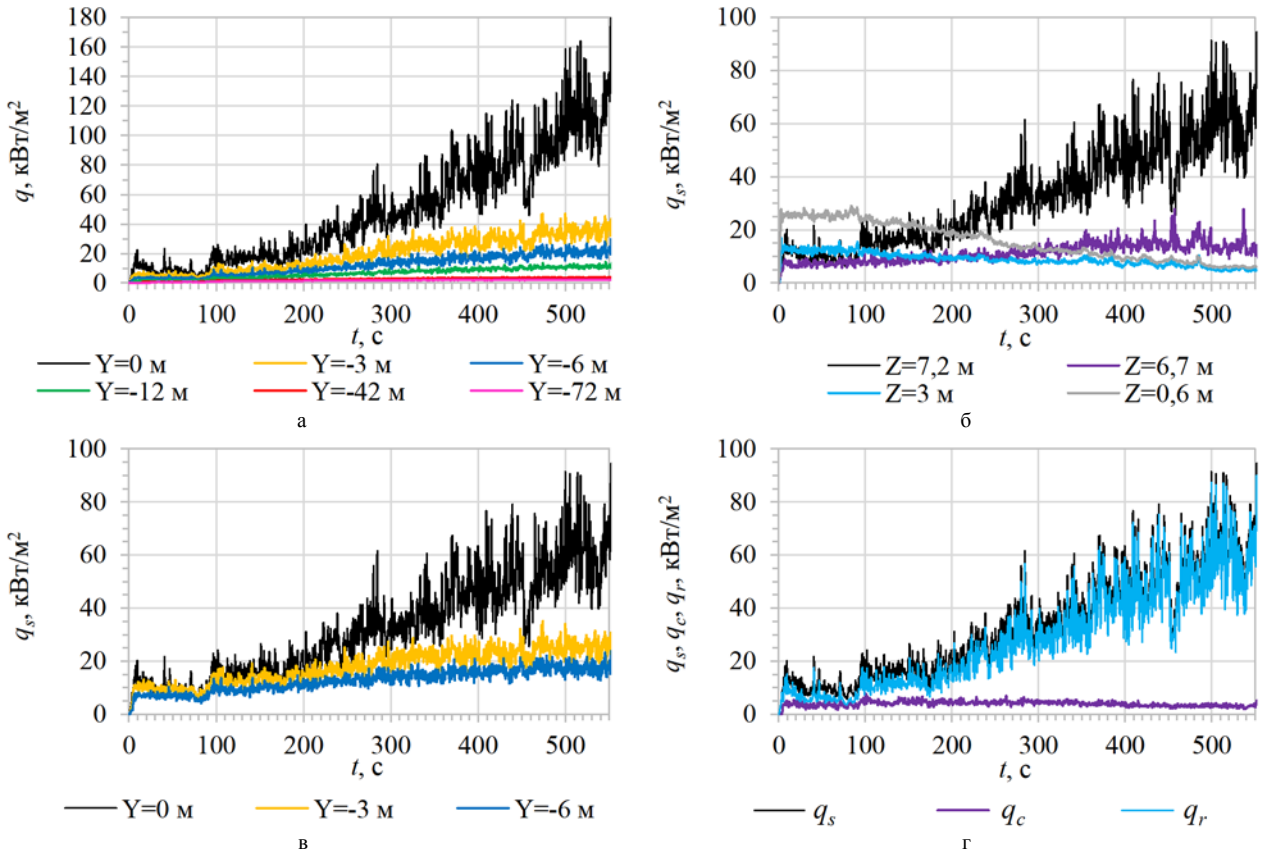


Рис. 5. Временные графики плотности теплового потока от газа q вблизи ограждений (а), плотности полного q_s (б, в, г), конвективного q_c (г) и лучистого q_r (г) теплового потока на поверхности ограждений: а, в, г – в плоскости $Z=7,2$; б – в плоскости $Y=0$

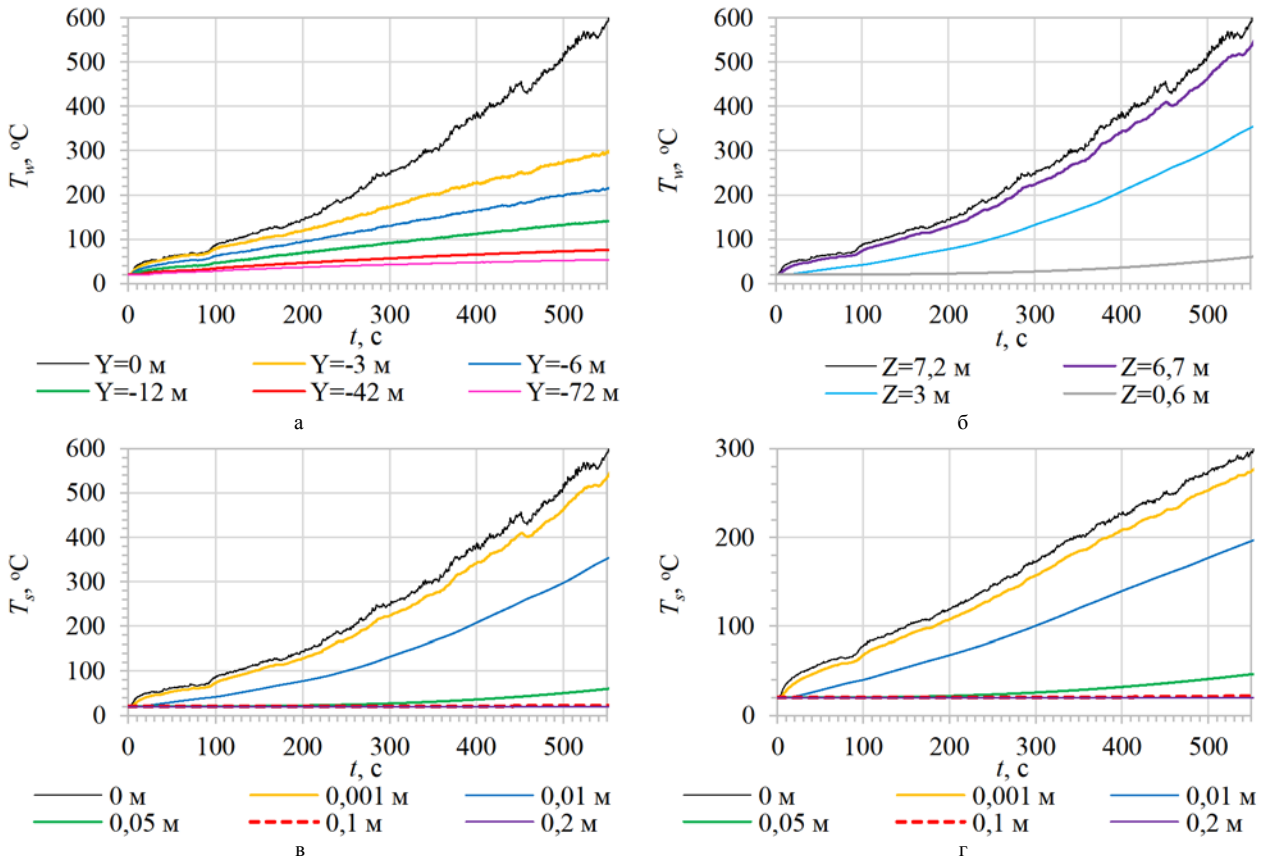


Рис. 6. Временные графики температуры на поверхности T_w (а, б) и внутри T_s (в, г) ограждений:
а, в, г – в плоскости $Z=7,2$; б – в плоскости $Y=0$

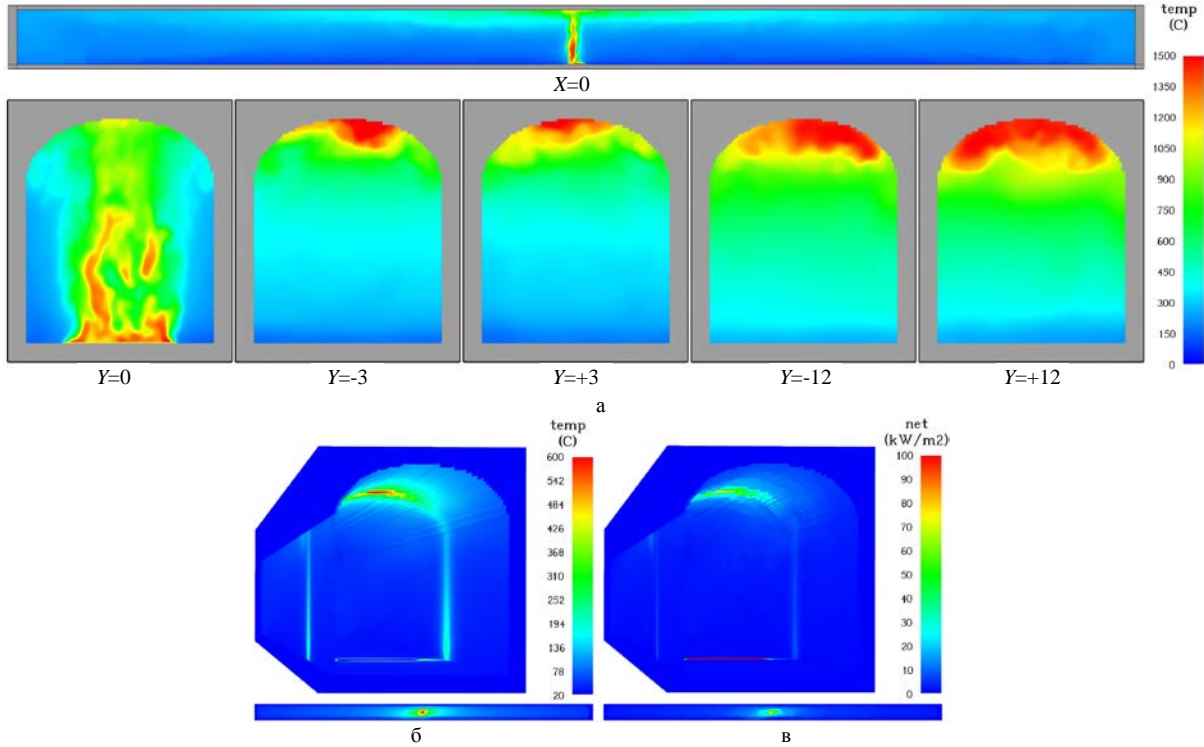


Рис. 7. Двухмерные и трехмерные поля в момент времени 550 с: а – температура газовой среды T в вертикальных сечениях; б – температура поверхности ограждений T_w ; в – плотность полного теплового потока на поверхности ограждений q_s .

С использованием построенной модели при варьировании отдельных ее параметров проведены серии дополнительных опытов, в результате которых установлено:

1. Начальная температура T_0 газовой среды и твердых поверхностей ПИЛ оказывает влияние на

количественные характеристики тепловых процессов. В частности, при $T_0 = 20\text{ °C}$ и $T_0 = 5,6\text{ °C}$ на момент окончания моделирования разница температуры газа T вблизи ограждений составила 55 °C (рис. 8, а), температуры T_w на поверхности горной породы – 66 °C (рис. 8, б).

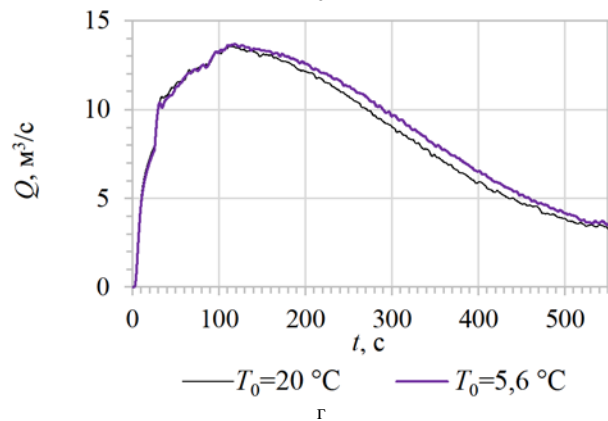
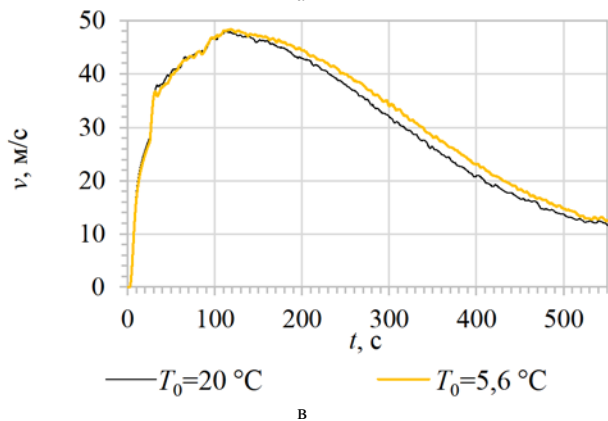
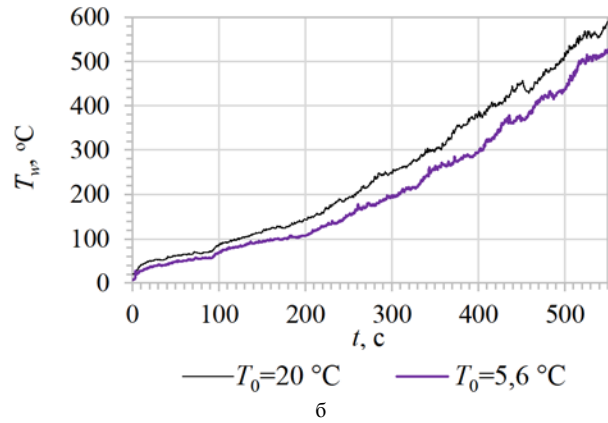
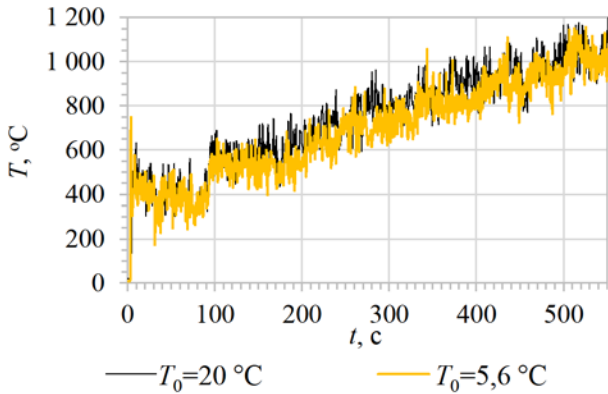


Рис. 8. Временные графики параметров газовой среды при вариации начальной температуры T_0 : а – температура газовой среды T (в плоскости $Y=0$); б – температура поверхности ограждений T_w (в плоскости $Y=0$); в – скорость потока газа в сечении воздуховода v ; г – объемный расход газа в сечении воздуховода Q

Значение принятой при расчетах начальной температуры T_0 имеет следующее обоснование. Известно, что на небольших глубинах, относительно поверхности земли, температура грунта постоянна и близка к среднегодовой температуре у поверхности. Однако с ростом глубины, начиная с 10–20 м в зависимости от региона, температура грунта возрастает вследствие эндогенных факторов. Согласно данным, приведенным в [22] в области Западно-Сибирской и Восточно-Сибирской платформ, на границе которых находится участок размещения комплекса подземных сооружений, включающего ПИЛ, геотермический градиент, который характеризует отношение разности температур между двумя точками, лежащими на разной глубине, составляет 1–3,5 °С.

Таким образом, при среднегодовой температуре воздуха в местности +0,5 °С [23], если принять верхнюю границу зоны нарастания температур грунта 20 м [22], температура горной породы на глубине 525 м лежит в диапазоне 5,6–18,2 °С. При проведении эксперимента для нижней границы диапазона помимо начальной

температуры твердых поверхностей $T_0 = 5,6$ °С, задаваемой в свойствах поверхности, также в модели была создана зона начальных значений температуры газовой среды [20] в границах свободного пространства ПИЛ. Температура во внешней среде не менялась относительно базовой модели и составляла 20 °С.

Помимо отличий в количественных характеристиках тепловых процессов (рис. 8, а, б) следует отметить более интенсивный газообмен между пространством ПИЛ и внешней средой при $T_0 = 5,6$ °С, обусловленный разностью температур, который характеризуется скоростью потока v и объемным расходом Q газа в сечении воздуховода (рис. 8, в, г).

2. Задание тепловых свойств горной породы по минимальным (см. выше) и максимальным ($c_s = 750$ Дж/кг·К, $\lambda_s = 2,99$ Вт/м·К, $\rho_s = 275$ кг/м³) значениям экспериментальных данных [1, 19] не оказывает существенного влияния на динамику температуры газовой среды (рис. 9, а), однако приводит из различной интенсивности прогрева ограждений (рис. 9, б).

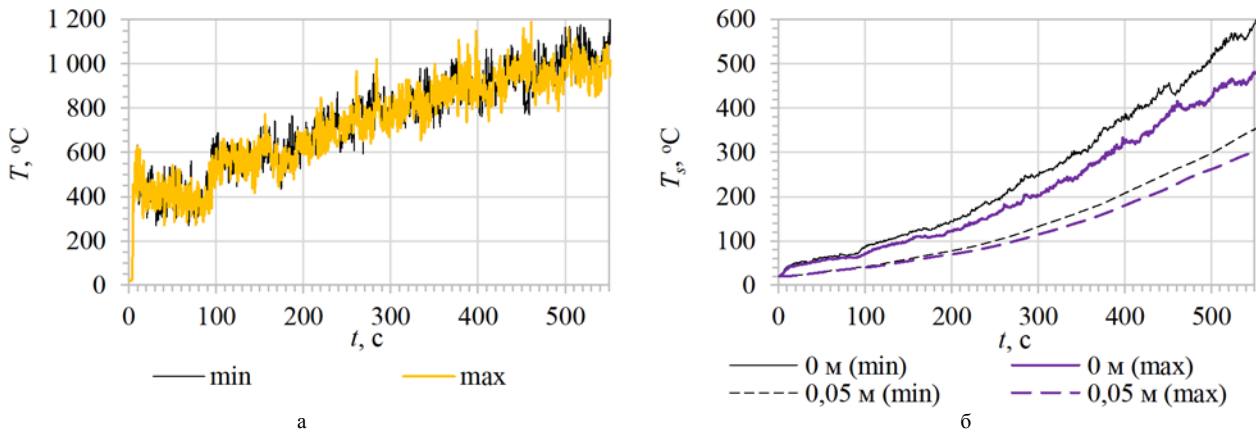


Рис. 9. Временные графики температуры газовой среды T (а) и температуры внутри ограждений T_s (б) при вариации теплофизических характеристик ограждений (в плоскости $Y=0$): min – минимальные значения; max – максимальные значения

3. При исследовании влияния на динамику пожара вида горючей нагрузки выявлено, что наиболее высокие значения температуры газовой среды T и горной породы T_w , T_s наблюдаются при горении индустриального масла (рис. 10), обладающего большей мощностью тепловыделения относительно других выбранных для анализа веществ и материалов. Так, низшая теплота сгорания, которой пропорциональна мощность

тепловыделения при прочих равных условиях, для масла составляет $Q_H = 42,7$ МДж/кг [21]. Горение резины ($Q_H = 36,0$ МДж/кг), поливинилхлорида (ПВХ) ($Q_H = 25,0$ МДж/кг) и древесины ($Q_H = 13,8$ МДж/кг) за время моделирования приводит к существенно менее интенсивному росту температуры газа – не более 446 °С (рис. 10, а) и ограждений – не более 82 °С (рис. 10, б).

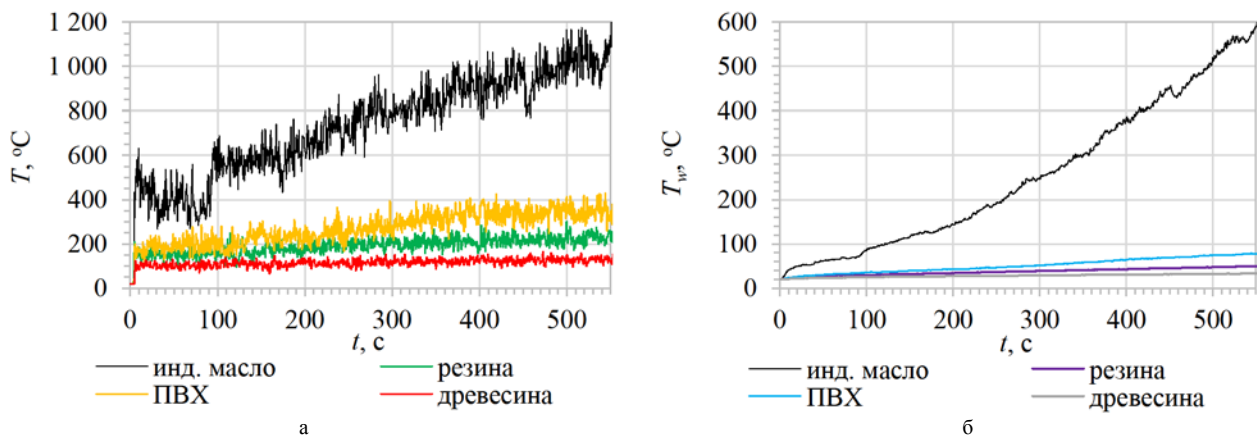


Рис. 10. Временные графики температуры газовой среды T (а) и температуры на поверхности ограждений T_w (б) при вариации горючей нагрузки (в плоскости $Y=0$)

4. Как показал частично проведенный анализ возможностей численного расчета при соотношениях между количеством ячеек сетки, отличным от $2^l 3^m 5^n$ [3], физическое время моделирования возрастает. В частности, при входных данных, близких к базовой модели, таком же размере ячеек (табл. 1) но, неоптимальном количестве ячеек в сетках (общее количество 1530368), время расчета увеличивается в 3,9 раза.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные, полученные в результате проведенного компьютерного моделирования пожара в ПИЛ в соответствии с предложенной технологией (рис. 2) позволяют обоснованно задать диапазоны изменения температурных показателей среды для лабораторного исследования изменений характеристик ядра горных выработок Нижне-Канского массива при термических воздействиях, включая термогравиметрический, микроскопический, рентгенофазовый анализ образцов, а также изучение прочности породы при осевом сжатии [19, 24].

Другой областью применения разработанной технологии и созданных компьютерных моделей ПИЛ, принимая во внимание выявленные особенности, является проверка на основе численных экспериментов эффективности систем противопожарной защиты на объекте, анализ динамики пожара при различных условиях вентиляции, в т.ч. принудительной, а также моделирование прогрета ограждений не только при свободном развитии пожара, но и при воздействии на них огнетушащих веществ [2, 25].

Кроме того, на базе рассмотренного подхода можно строить обучающие и тестовые выборки для настройки нейросетевых моделей, позволяющих решать различные задачи обеспечения пожарной безопасности в ПИЛ. Например, прогнозировать в режиме реального времени изменения температурного поля поверхности ограждений при пожаре. Для этого проводится ряд компьютерных экспериментов, позволяющих оценить прогрев горной породы при различных сценариях пожара. Полученные в необходимом количестве и качестве результаты используются для построения выборок, на основе которых производится обучение и верификация прогнозирующей нейросетевой модели. На вход такой системы искусственного интеллекта при

пожаре поступают показания датчиков, рассредоточенных вдоль ограждений, на выходе – формируется распределение температур по всей поверхности гнейса на заданном прогнозном временном интервале.

Учитывая быстродействие нейросетей, которое соответствует режиму реального времени, подобные системы позволяют оперативно оценивать обстановку на объекте и принимать соответствующие решения, в том числе и автоматизировано.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] 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: 01.05.2024).
- [2] Пожаркова И. Н. Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования // Пожаровзрывобезопасность. – 2024. – Т. 33. – №. 4.
- [3] Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model // NIST Special Publication 1018-1, 2023.
- [4] Мельничук С. Ф., Голиков А. Д. Компьютерное моделирование пожара в тоннеле // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. IV. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2008. – С. 116–117.
- [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. – 2012. – Т. 21. – №. 4. – С. 33–37.
- [6] Schrefler B. A. et al. Concrete at high temperature with application to tunnel fire // Computational mechanics. – 2002. – Т. 29. – С. 43–51.
- [7] Lai H., Wang S., Xie Y. Study on the fire damage characteristics of the new Qidaoliang highway tunnel: Field investigation with computational fluid dynamics (CFD) back analysis // International journal of environmental research and public health. – 2016. – Т. 13. – №. 10. – С. 1014.
- [8] 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.
- [9] Ulm F. J., Acker P., Lévy M. The “Chunnel” fire. II: Analysis of concrete damage // *Journal of engineering mechanics*. – 1999. – Т. 125. – №. 3. – С. 283–289.
- [10] Feist C., Aschaber M., Hofstetter G. Numerical simulation of the load-carrying behavior of RC tunnel structures exposed to fire // *Finite elements in analysis and design*. – 2009. – Т. 45. – №. 12. – С. 958–965.
- [11] Amouzandeh A., Zeiml M., Lackner R. Real-scale CFD simulations of fire in single-and double-track railway tunnels of arched and rectangular shape under different ventilation conditions // *Engineering structures*. – 2014. – Т. 77. – С. 193–206.
- [12] Hua N., Khorasani N. E., Tessari A. Numerical modeling of the fire behavior of reinforced concrete tunnel slabs during heating and cooling // *Engineering Structures*. – 2022. – Т. 258. – С. 114135.
- [13] 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.
- [14] Caner A., Böncü A. Structural fire safety of circular concrete railroad tunnel linings // *Journal of structural engineering*. – 2009. – Т. 135. – №. 9. – С. 1081–1092.
- [15] Шалимов А. В. и др. Моделирование динамики тепловых депрессий и ее влияния на проветривание горных выработок // *Недропользование*. – 2014. – №. 12. – С. 41–47.
- [16] Hua N., Elhami-Khorasani N., Tessari A. Review of tunnel fire damage assessment methods and techniques // *Transportation research record*. – 2021. – Т. 2675. – №. 5. – С. 279-290.
- [17] Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования: ГОСТ Р 50.1.028-2001 // СПС «КонсультантПлюс».
- [18] Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide, Volume 3: Validation // NIST Special Publication 1018-3, 2023.
- [19] 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.
- [20] Pyrosim 2023.3. Руководство пользователя // FireCat – pyrosim.ru : сайт. – URL: https://www.pyrosim.ru/download/Pyrosim_manual.pdf (дата обращения: 01.05.2024).
- [21] Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. – М.: Академия ГПС МВД России, 2005. – 118 с.
- [22] Дегтярев К. Тепло земли // *Наука и жизнь*. – 2013. – №. 9. – С. 27–36.
- [23] Свод правил. Строительная климатология: СП 131.13330.2020 // СПС «КонсультантПлюс».
- [24] Трояк Е. Ю., Мельникова Е. С. Исследование микроструктуры керна скважин подземной исследовательской лаборатории участка «Енисейский» при термическом воздействии // *Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций : Сборник материалов Международной научно-практической конференции, 2023*. – С. 41–45.
- [25] Пожаркова И. Н. Анализ задач и методов математического моделирования пожаров в тоннельных сооружениях // *Инженерный вестник Дона*. – 2024. – № 5(113). – С. 1–15.

Ирина Николаевна Пожаркова, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск; доцент кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, г. Красноярск.

Technology for assessing the heating of rock during a fire in an underground research site laboratories

I. N. Pozharkova

Abstract—The article is devoted to mathematical modeling of processes during a fire in an underground research laboratory of a final isolation facility for radioactive waste. Methods for calculating heat transfer in solids, which are used in studies devoted to analyzing the stability of tunnel structures in case of fire, are considered. A functional assessment diagram was constructed based on numerical modeling of the heating of rock enclosing an underground research laboratory. Input parameters that are significant from the point of view of the problem being solved have been identified, characterizing, on the one hand, the geometric, thermophysical, and fire hazardous properties of the object under study, and on the other hand, specific settings of the modeling environment. The process of creating a model of an underground research laboratory in FDS format is described, the values of the setting parameters are indicated, and the rationale for the components used is given. Measuring elements are presented that are used to save the estimated physical quantities during the calculation process and provide the possibility of subsequent visualization of the simulation results in accordance with the outputs of the functional diagram. The results of modeling a fire in an underground research laboratory for various scenarios of its development are presented. The ranges of changes in the parameters of the gas environment, heat flux density and temperature on the surface of the fences, the temperature inside solid bodies have been established when varying: the type of combustible load, the thermal properties of the rock, and the initial temperature. The prospects for using the presented technology are formulated, including for validly setting the conditions for conducting fire tests of rock samples, checking the effectiveness of fire protection systems at the site, and setting up neural network models.

Keywords—fire modeling, heat transfer, FDS, tunnel, mine working, thermal impact, fencing.

REFERENCES

- [1] Materials to justify the license for the construction of a radioactive waste storage facility not related to nuclear installations, created in accordance with the design documentation for the construction of final isolation facilities for radioactive waste (Krasnoyarsk Territory, Nizhne-Kansky massif) as part of an underground research laboratory (including preliminary materials for assessing the impact on the environment Wednesday). Vol. 1. FSUE «National Operator for Radioactive Waste Management»: website. – URL: https://www.norao.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf (date of the application: 01.05.2024). (In Russ.).
- [2] I. N. Pozharkova. Study of the temperature regime of a fire in an underground research laboratory based on numerical modeling. *Fire and Explosion Safety*, 2024, vol. 33, no. 4. (In Russ.).
- [3] Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018-1, 2023, 230 p. (In Eng.).
- [4] S. F. Melnichuk, A. D. Golikov. Computer modeling of a fire in a tunnel, in *Materials of the all-russian interuniversity scientific and technical conference of students and postgraduate students*, part IV, 2008, pp. 116–117. (In Russ.).
- [5] I. A. Bolodyan, S. V. Puzach, A. S. Baranovsky. Numerical modeling of fire in a road tunnel. Selection of calculation grid. *Fire Safety*, 2021, no. 3 (104), pp. 47–54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.72.64.005. (In Russ.).
- [6] B. A. Schrefler et al. Concrete at high temperature with application to tunnel fire. *Computational mechanics*, 2002, vol. 29, pp. 43–51. (In Eng.).
- [7] H. Lai, S. Wang, Y. Xie. Study on the fire damage characteristics of the new Qidaoliang highway tunnel: Field investigation with computational fluid dynamics (CFD) back analysis. *International journal of environmental research and public health*, 2016, vol. 13, no. 10, p. 1014. (In Eng.).
- [8] A. A. Tarantsev, S. A. Kondratyev, M. D. Ruzmanov, D. V. Khimchuk. Software modeling for solving problems of ensuring fire safety in tunnels. *Military Engineer*, 2022, no. 1(23), pp. 57–63. (In Russ.).
- [9] F. J. Ulm, P. Acker, M. Lévy. The “Chunnel” fire. II: Analysis of concrete damage. *Journal of engineering mechanics*, 1999, vol. 125, no. 3, pp. 283–289. (In Eng.).
- [10] C. Feist, M. Aschaber, G. Hofstetter. Numerical simulation of the load-carrying behavior of RC tunnel structures exposed to fire. *Finite elements in analysis and design*, 2009, vol. 45, no. 12, pp. C. 958–965. (In Eng.).
- [11] A. Amouzandeh, M. Zeiml, R. Lackner. Real-scale CFD simulations of fire in single-and double-track railway tunnels of arched and rectangular shape under different ventilation conditions. *Engineering structures*, 2014, vol. 77, pp. 193–206. (In Eng.).
- [12] N. Hua, N. E. Khorasani, A. Tessari. Numerical modeling of the fire behavior of reinforced concrete tunnel slabs during heating and cooling. *Engineering Structures*, 2022, vol. 258, pp. 114135. (In Eng.).
- [13] I. V. Lugin, E. L. Alferova. Heat and mass transfer processes during train combustion in a single-track metro tunnel. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, no. 7, pp. 324–332. (In Russ.).
- [14] A. Caner, A. Böncü. Structural fire safety of circular concrete railroad tunnel linings. *Journal of structural engineering*, 2009, vol. 135, no. 9, pp. 1081–1092. (In Eng.).
- [15] A.V. Shalimov et al. Modeling the dynamics of thermal depressions and its influence on the ventilation of mine workings. *Subsoil use*, 2014, no. 12, pp. 41–47. (In Russ.).
- [16] N. Hua, N. Elhami-Khorasani, A. Tessari. Review of tunnel fire damage assessment methods and techniques. *Transportation research record*, 2021, vol. 2675, no. 5, pp. 279-290. (In Eng.).
- [17] Recommendations for standardization. Information technologies for product life cycle support. Functional modeling methodology: GOST R 50.1.028-2001. SPS “ConsultantPlus”. (In Russ.).
- [18] Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide, Volume 3: Validation. NIST Special Publication 1018-3, 2023. (In Eng.).
- [19] D. A. Ozersky, A. I. Orlova. Strength characteristics of rock and their analysis in the construction safety assessment of underground URF structures. *Radioactive waste*, 2023, no. 1(22), pp. 70–76. (In Russ.).
- [20] Pyrosim 2023.3. User guide. FireCat – pyrosim.ru : website. – URL: https://www.pyrosim.ru/download/Pyrosim_manual.pdf (date of the application: 01.05.2024). (In Russ.).
- [21] Yu. A. Koshmarov. *Forecasting hazardous factors of indoor fire*. State Fire Academy EMERCOM of Russia, 2005, 118 p. (In Russ.).

- [22] K. Degtyarev. Heat of the Earth. *Science and Life*, 2013, no. 9, pp. 27–36. (In Russ.).
- [23] Set of rules. Construction climatology: SP 131.13330.2020. SPS “ConsultantPlus”. (In Russ.).
- [24] E. Yu. Troyak, E. S. Melnikova. Study of the microstructure of the well core of the underground research laboratory of the Yenisei site under thermal influence, in *Monitoring, modeling and forecasting of hazardous natural phenomena and emergency situations: Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference*, 2023, pp. 41–45. (In Russ.).
- [25] I. N. Pozharkova. Analysis of problems and methods for mathematical modeling of fires in tunnel structures. *Engineering journal of Don*, 2024, no. 5(113), pp. 1–15. (In Russ.).

Pozharkova Irina Nikolaevna, candidate of technical sciences, docent, professor of department of technical examinations and criminalistics, FSBEI HE Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk; associate professor of department of automation, automated control and design systems, FSAEI HE Siberian federal university, Krasnoyarsk.