

Анализ задач и методов математического моделирования пожаров в тоннельных сооружениях

И.Н. Пожаркова^{1,2}

¹Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железнодорожск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

Аннотация: В статье представлен систематический обзор научных работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных математическому моделированию пожаров в тоннелях различного назначения. В результате поиска в базах научных публикаций eLIBRARY.RU и Google Scholar, были выделены 30 наиболее релевантных статей, содержащих эмпирические данные, полученные по результатам исследования пожаров в транспортных тоннелях, а также горных выработках. Выполнена классификация публикаций по видам тоннельных сооружений, форме поперечного сечения, предмету исследования, применяемой математической модели для описания процессов тепломассопереноса в газовой среде и прогрева ограждающих конструкций при пожаре и другим аспектам. Установлено, что слабо изученной является проблема прогнозирования динамики пожара в тоннельных сооружениях глубокого заложения, а также математического моделирования пожара в тоннеле с учетом работы систем противопожарной защиты.

Ключевые слова: моделирование пожара, тоннель, математическая модель, прогнозирование пожара, теплоперенос, конструкции, систематический обзор.

Тоннельные сооружения являются элементами транспортной инфраструктуры и широко используются во всем мире при прокладке автомобильных, железнодорожных дорог, метрополитена. При авариях транспортных средств в тоннелях возможно возникновение пожароопасных ситуаций, которые характеризуются: наличием большого количества горючей нагрузки, представленной как материалами, использованными при изготовлении транспорта, так и топливом, перевозимыми грузами; быстрым распространением пожара по пространству сооружения; угрозой разрушения его несущих конструкций.

Прогнозирование динамики пожара и его последствий в настоящее время зачастую осуществляется на основе компьютерного моделирования процессов тепломассообмена при горении. Такой подход позволяет избежать проведения дорогостоящих и трудноосуществимых натуральных экспериментов,

когда изучаемым объектом являются такие объемных сооружения как тоннели, длина которых может составлять десятки километров.

При этом не существует какой-либо общей методики моделирования пожаров в тоннелях – специалисты используют различный математический аппарат, программное обеспечение, учитывают широкий перечень факторов в качестве исходных параметров модели, выделяют разного рода предметы исследования и т.д. Кроме того, геометрические характеристики тоннелей обуславливают существенное отличие динамики физических процессов при пожаре относительно наблюдаемых в помещениях и зданиях различного функционального назначения, для которых в литературе описано достаточное количество примеров распространения пожара.

В данной статье представлен анализ научных публикаций, посвященных математическому моделированию пожаров в тоннельных сооружениях. Методологической основой исследования является систематический обзор научной литературы по проблеме.

Цель исследования заключается в систематизации современных методов расчета параметров пожара в тоннелях для выявления ключевых факторов, которые позволяют выполнить обоснованное прогнозирование динамики пожара с точки зрения воздействия на людей и ограждающие конструкции на основе аналитического или численного моделирования.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- определены ключевые слова, по которым производился поиск в базах научных публикаций eLIBRARY.RU и Google Scholar;
 - осуществлен поиск наиболее релевантных научных работ, посвященных моделированию пожаров в тоннельных сооружениях;
 - выполнена оценка качества найденных статей и отбор удовлетворяющих цели исследования;
-

- проведен анализ эмпирических данных, представленных в научных работах, и классификация публикаций по различным признакам.

В соответствии с целью исследования определены два направления, которые отражались в поисковых запросах: во-первых, статья должна быть посвящена математическому моделированию пожара, во-вторых, в работе представлены данные применительно к тоннельному сооружению. Для того, чтобы избежать избыточности результатов поиска, при формулировании запроса на русском и английском языках учитывались одновременно оба понятия: «моделирование пожара» и «тоннель». Соответствующие критериям публикации выбирались из статей в журналах и материалов конференций, представленных в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU и системе Google Scholar, индексирующей значительную часть мировой научной литературы. Полями для поиска указывались название публикации, аннотация, ключевые слова. Не задавались ограничения на другие параметры, такие, как временной интервал или язык.

Поиски были проведены в апреле 2024 года и дали в общей сложности более 100 тысяч результатов: 24 публикации в базе eLIBRARY.RU, 1430 – в русскоязычном сегменте Google Scholar, 112000 – в англоязычном сегменте Google Scholar. По результатам поиска были отобраны 30 работ, которые приведены в списке литературы: 12 – на русском языке, 18 – на английском (рис.1), наиболее соответствующих цели исследования и отвечающих следующим критериям: возможность доступа к полнотекстовому варианту, материал опубликован в рецензируемом издании, статья имеет значительное количество цитирований (для Google Scholar), наличие описания результатов собственных экспериментов авторов. Не рассматривались обзорные и дублирующие статьи, т.е. при наличии материалов сходной тематики одного авторского коллектива приоритет отдавался публикации в более авторитетном издании. Таким образом, из выбранных 30 статей,

29 опубликованы в периодических журналах, 1 – в сборнике по итогам конференции. Большинство статей (23 из 30) изданы после 2010 года, что объясняется использованием при проведении исследований компьютерного моделирования на базе программных средств, получивших широкое распространение в последние годы. Среди ключевых слов к рассмотренным статьям чаще всего встречались указанные на рис.1.

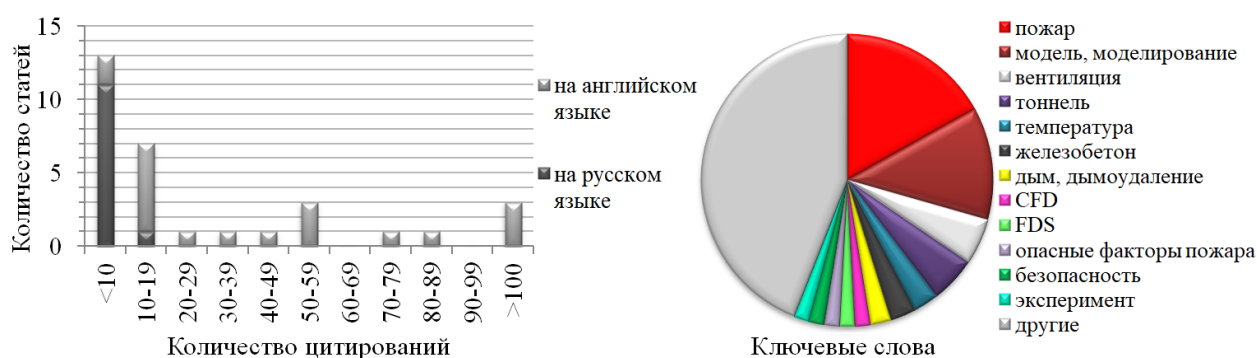


Рис. 1. – Диаграммы цитируемости статей по данным Google Scholar и используемых ключевых слов

Научные публикации были систематизированы (табл.1) согласно следующим выявленным основным аспектам исследования: математическая модель и программное обеспечение, применяемые для расчета тепломассообмена при пожаре, геометрические характеристики и назначение исследуемого тоннельного сооружения, предмет исследования, масштабирование модели, валидация полученных данных.

Большинство публикаций посвящено исследованию пожаров в транспортных тоннелях, т.е. расположенных вблизи поверхности: автомобильных, железнодорожных, метро (табл.1). Однако в списке присутствуют также работы, затрагивающие проблему распространения пожара в протяженных горных выработках, рудниках и шахтах глубокого заложения [1-3].

Таблица № 1

Классификация научных публикаций, посвященных моделированию пожаров
в тоннелях

Статья	Вид тоннеля				Сечение тоннеля		Предмет исследования					Математическая модель			Валидация	Масштабирование
	авто	ж/д	метро	другое	прямоугольное	арочное	ОФП	воздействие на конструкции	температура газа	вентиляция	другое	CFD	одномерные, аналитические	гибридные		
[1]				+		+		+		+	+		+			
[2]				+	+		+			+	+	+	+			+
[3]				+		+				+	+	+	+			+
[4]			+		+		+				+		+			
[5]			+			+					+		+			
[6]			+			+	+	+					+			
[7]		+	+			+		+			+		+			
[8]		+			+			+					+			+
[9]	+				+			+	+			+				
[10]	+				+			+	+			+				
[11]		+			+		+	+				+				
[12]		+			+	+		+		+	+	+			+	+
[13]	+					+		+	+		+	+			+	
[14]	+				+		+		+	+	+	+				
[15]						+			+	+	+	+			+	+
[16]	+					+			+	+	+			+		
[17]	+						+				+	+				
[18]		+			+		+				+	+				
[19]	+	+	+		+				+		+	+	+		+	
[20]					+				+		+	+	+			
[21]	+					+		+			+	+			+	
[22]					+				+	+	+			+		
[23]	+				+					+	+	+			+	+
[24]	+				+				+	+	+		+		+	+
[25]	+								+	+	+		+		+	+
[26]				+				+	+							
[27]			+							+			+			
[28]		+			+			+						+	+	
[29]		+			+			+					+		+	
[30]	+				+		+			+		+			+	

Функциональное назначение тоннеля обуславливает его конструкцию и проектные размеры, а также форму поперечного сечения, которое может быть прямоугольным, иметь арочную верхнюю часть или иную сложную форму. Анализ публикаций (табл.1) показал, что чаще авторы задают тоннели прямоугольного сечения, что в ряде случаев обусловлено ограничениями используемых математических моделей. Однако некоторые авторы принимают подобную форму для упрощения моделей и сокращения времени численных расчетов.

По предмету исследования в первую очередь нужно выделить работы, в которых рассматривается изменение параметров газовой среды при пожаре в тоннеле: температуры, концентрации токсичных продуктов горения, оптической плотности дыма и других опасных факторов пожара (ОФП) с точки зрения негативного воздействия на человека (табл.1).

Также можно сделать вывод, что математическое моделирование широко применяется при исследовании влияния вентиляции на динамику пожара (табл.1). Ограничение или усиление газообмена в зависимости от используемой схемы вентиляции влияет как на интенсивность горения, так и на объем удаляемых в окружающую среду продуктов горения [4–5].

В некоторых исследованиях решается задача моделирования теплового воздействия на конструкции тоннеля при пожаре, которое может привести к его разрушению. При этом авторы используют следующие методы:

- расчет на основе математического моделирования динамики изменения температуры газовой среды и теплового потока вблизи поверхности несущих строительных конструкций и последующее сравнение полученных величин с критическими значениями. Такой подход, в частности, использован в работах [6–8];

- аналитический или численный расчет прогрева несущих строительных конструкций при заданном тепловом воздействии на них [9–11];

- синхронное моделирование изменения при пожаре температуры газовой среды и, как следствие, температуры поверхности и точек внутри конструкций [12–13].

Другими факторами, которые анализируются или варьируются при проведении исследований, являются: размеры и количество расчетных сеток [14–16], уклон тоннеля относительно горизонтали [17], мощность [1, 15, 18] и другие энергетические характеристики пожара [19–21], расход [1, 16, 22] и скорость газа в сечении тоннеля [12, 15–16] и вентиляции [22–24], тепловой поток [15, 21], концентрация кислорода [2–3, 7], свойства горючей нагрузки [19, 25], размеры тоннеля [19, 23], высота дымового слоя [19–20], давление [16], временной шаг расчета [16], количество зон в пространстве тоннеля [19–20], скорость движения очага пожара [25], угол наклона пламени [25], теплоотвод с дымовыми газами [24], методология оценки повреждения конструкций [26].

Изучение методов исследования показало, что в более ранних работах, а также в публикациях, посвященных расчету прогрева ограждений (табл.1), используются относительно простые аналитические и одномерные математические модели, которые предполагают, что все физические переменные постоянны в одной из плоскостей, что снижает точность их прогноза. При этом подобные модели отличаются низкой требовательностью к вычислительным ресурсам. Для их реализации авторы применяют как программное обеспечение собственной разработки [24, 27], так и широко распространенные продукты, такие, как CFAST [19–20], FE SAFIR [8].

С ростом производительности компьютеров последние годы специалисты выполняют исследования преимущественно на базе моделей

вычислительной гидродинамики (CFD), позволяющих получить детальное описание процессов в газовой среде для любой заданной точки тоннельного сооружения (табл.1). Автоматизированный численный расчет по моделям CFD отечественные [9, 11, 18] и зарубежные [2, 15, 23] авторы чаще всего реализуют на базе программной платформы FDS. Также используются программы SOFIE [14, 17], OpenFOAM [12], JASMINE [19], CFX [20], Fluent [3, 21–22].

В некоторых работах [16, 22, 28] обосновывается возможность применения гибридных моделей, сочетающих высокую точность расчета методами CFD для отдельных областей пространства с высокой скоростью моделирования для тех участков тоннеля, где не требуется значительной степени детализации параметров газовой среды.

Ряд исследователей, например [2, 29–30], уделяют внимание важной части любой научной работы – подтверждению достоверности полученных результатов. В случае получения экспериментальных данных на основе математического моделирования авторами проводится их валидация путем сравнения с аналогичными результатами натурных экспериментов.

Следствием низкой скорости расчета при решении задач методами CFD являются попытки специалистов выполнить исследование процессов в газовой среде тоннеля при пожаре с использованием моделей уменьшенного масштаба (табл.1). При масштабировании на основе критерия подобия Фруда пропорционально сокращается мощность пожара. При этом продолжаются исследования по обоснованию области применения подобного подхода, а также разработке методики масштабирования других безразмерных чисел, помимо числа Фруда.

На основе проанализированных выше научных работ, посвященных математическому моделированию пожара в тоннельных сооружениях, выявлены аспекты, на которые могут ориентироваться специалисты,

выполняющие аналогичные исследования. В зависимости от изучаемой проблемы, компетенций членов научного коллектива, имеющихся в наличии программных и аппаратных средств, применяя предложенную классификацию (табл.1), авторы могут выбрать тот или иной подход к моделированию, опираясь на работы предшественников.

Следует отметить, что в базах научных публикаций представлено крайне мало результатов исследования пожаров в тоннелях, расположенных на значительной глубине (десятки и сотни метров) относительно поверхности, например, горных выработок. Подобное расположение, очевидно, создаст особые условия газообмена между пространством тоннеля и окружающей средой из-за перепада гидростатических давлений и плотности газа по высоте горной выработки, возникновению естественной тяги, которая усиливается в условиях пожара. Кроме того, динамика теплоотвода и прогрева горной породы, ограждающей подобный тоннель, будет отличаться от детально исследованной для железобетонных конструкций тоннельных сооружений транспортной инфраструктуры. Таким образом, представляет интерес изучение подобных процессов с учетом теплофизических свойств горной породы, комбинации различных отделочных материалов внутренней поверхности подземного тоннеля, давления грунта и воды, а также других факторов.

Еще одним перспективным направлением исследования, которое не отражено в рассмотренных работах (табл.1), является моделирование пожара в тоннеле с учетом работы систем противопожарной защиты, таких как автоматические установки пожаротушения, системы противодымной защиты, противопожарные занавесы и др.

Литература

1. Шалимов А.В., Кормщиков Д.С., Газизуллин Р.Р., Сёмин М.А. Моделирование динамики тепловых депрессий и ее влияния на проветривание горных выработок // Недропользование. 2014. №. 12. С. 41–47.
 2. 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. №. 10. pp. 3380.
 3. 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. №. 2. pp. 701–706.
 4. Агеев П.М., Шарапов 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.
 5. Садыгов А.Б. Моделирование движения воздушных потоков в подземных сооружениях метрополитена при пожаре // Электронная обработка материалов. 2012. Т. 48. №. 2. С. 118–125.
 6. 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.
 7. Caner A., Böncü A. Structural fire safety of circular concrete railroad tunnel linings // Journal of structural engineering. 2009. vol. 135. №. 9. pp. 1081–1092.
 8. 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. vol. 258. pp. 114135.
-

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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. vol. 77. pp. 193–206.
13. 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. vol. 13. №. 10. pp. 1014.
14. 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.
15. Blanchard E., Boulet P., Desanghere S., Cesmat E., Meyrand R., Garo J. P., Vantelon J. P. Experimental and numerical study of fire in a midscale test tunnel // Fire Safety Journal. 2012. vol. 47. pp. 18–31.
-

16. 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. №. 1. pp. 16–29.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Chow W.K. Simulation of tunnel fires using a zone model // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1996. vol. 11. №. 2. pp. 221–236.
 20. Jain S., Kumar S., 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. №. 2. pp. 160–170.
 21. Schrefler B.A., Brunello P., Gawin D., Majorana C.E., Pesavento, F. Concrete at high temperature with application to tunnel fire // *Computational mechanics*. 2002. vol. 29. pp. 43–51.
 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.
 23. Lanchava O., Ilias N., Radu S.M., Makharadze L., Kunchulia T., Arudashvili N., Khokerashvili Z. Analysis of the parameters of the fire modeled in a road tunnel // *Georgian Scientists*. 2020. vol. 2. №. 4.
 24. 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. vol. 91. pp. 312–319.
-

25. 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. С. 105571.
26. Hua N., Khorasani N.E., Tessari A. Review of tunnel fire damage assessment methods and techniques // *Transportation research record*. 2021. vol. 2675. №. 5. pp. 279-290.
27. 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.
28. Ulm F.J., Acker P., Lévy M. The «Chunnel» fire. II: Analysis of concrete damage // *Journal of engineering mechanics*. 1999. vol. 125. №. 3. pp. 283–289.
29. 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. vol. 45. №. 12. pp. 958-965.
30. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Сушкина Е.Ю. Развитие экспериментальных исследований пожарной опасности автотранспортных тоннелей // *Пожарная безопасность*. 2013. №. 4. С. 87–92.

References

1. Shalimov A.V., Kormshchikov D.S., Gazizullin R.R., Sëmin M.A. *Nedropol'zovaniye*. 2014. №. 12. pp. 41–47.
 2. Fernandez-Alaiz F., Castanon A.M., Gomez-Fernandez F., Bascompta M. *Applied sciences*. 2020. vol. 10. №. 10. pp. 3380.
 3. Niu H.Y., Qiao C.L., An J.Y., Deng J. *Journal of Central South University*. 2015. vol. 22. №. 2. pp. 701–706.
 4. Ageyev P.M., Sharapov S.V., Golikov A.D. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MCHS Rossii»*. 2011. №. 4. pp. 67–75.
-



5. Sadygov A.B. Elektronnaya obrabotka materialov. 2012. vol. 48. №. 2. pp. 118–125.
 6. Lugin I.V., Alferova E.L. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2015. №. 7. pp. 324–332.
 7. Caner A., Böncü A. Journal of structural engineering. 2009. vol. 135. №. 9. pp. 1081–1092.
 8. Hua N., Khorasani N.E., Tessari A. Engineering Structures. 2022. vol. 258. pp. 114135.
 9. Vorogushin O.O., Korol'chenko A.YA., Lyapin A.V. Pozharovzryvobezопасnost'. 2012. vol. 21. №. 4. pp. 33–37.
 10. Mel'nichuk S.F., Golikov A.D. Materialy Vserossiyskoy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov. Part IV. SPb, 2008, pp. 116–117.
 11. Tarantsev A.A., Kondrat'yev S.A., Ruzmanov M.D., Khimchuk D.V. Voyennyy inzhener. 2022. № 1(23). pp. 57–63.
 12. Amouzandeh A., Zeiml M., Lackner R. Engineering structures. 2014. vol. 77. pp. 193–206.
 13. Lai H., Wang S., Xie Y. International journal of environmental research and public health. 2016. vol. 13. №. 10. pp. 1014.
 14. Bolod'yan I.A., Puzach S.V., Baranovskiy A.S. Pozharnaya bezопасnost'. 2021. № 4(105). pp. 31–39.
 15. Blanchard E., Boulet P., Desanghere S., Cesmat E., Meyrand R., Garo J.P., Vantelon J.P. Fire Safety Journal. 2012. vol. 47. pp. 18–31.
 16. Colella F., Rein G., Verda V., Borchiellini R. Computers & Fluids. 2011. vol. 51. №. 1. pp. 16–29.
 17. Bolod'yan I.A., Puzach S.V., Baranovskiy A.S. Pozharnaya bezопасnost'. 2021. №. 3 (104). pp. 47–54.
-

18. Danilov A.I., Sivakov I.A., Pilipenko N.V., Petrov A.V., Kostereva P.A. Nauchno-tehnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. 2017. vol. 17. № 2. pp. 340–347.
 19. Chow W.K. Tunnelling and Underground Space Technology. 1996. vol. 11. №. 2. pp. 221–236.
 20. Jain S., Kumar S., Kumar S., Sharma T.P. Tunnelling and Underground Space Technology. 2008. vol. 23. №. 2. pp. 160–170.
 21. Schrefler B.A., Brunello P., Gawin D., Majorana C. E., Pesavento, F. Computational mechanics. 2002. vol. 29. pp. 43–51.
 22. Verda V., Borchiellini R., Cosentino S., Guelpa E., Tuni J.M. Fire Technology. 2021. vol. 57. pp. 2491–2514.
 23. Lanchava O., Ilias N., Radu S.M., Makharadze L., Kunchulia T., Arudashvili N., Khokerashvili Z. Georgian Scientists. 2020. vol. 2. №. 4.
 24. Takeuchi S., Aoki T., Tanaka F., Moinuddin K.A. Fire Safety Journal. 2017. vol. 91. pp. 312–319.
 25. Li H., Zhu W., Tang M., Shi C., Tang F. Tunnelling and Underground Space Technology. 2024. vol. 145. C. 105571.
 26. Hua N., Khorasani N. E., Tessari A. Transportation research record. 2021. vol. 2675. №. 5. pp. 279-290.
 27. Romanchenko S.B., Chistyakov A.V., Butorin S.N. Pozharnaya bezopasnost'. 2015. №. 4. pp. 158–166.
 28. Ulm F.J., Acker P., Lévy M. Journal of engineering mechanics. 1999. vol. 125. №. 3. pp. 283–289.
 29. Feist C., Aschaber M., Hofstetter G. Finite elements in analysis and design. 2009. vol. 45. №. 12. pp. 958-965.
 30. Kopylov N.P., Khasanov I.R., Sushkina E.YU. Pozharnaya bezopasnost'. 2013. №. 4. pp. 87–92.
 31. **Дата поступления: 11.03.2024 Дата публикации: 26.04.2024**
-