

Review Article

Received: April 19, 2021

Accepted: July 02, 2021

Published: July 01, 2021

ISSN 2658-5553

Application of BIM technologies in the smoke removal and fire detection system in high-rise buildings

Melehin, Egor Markovich¹ 
Mohireva, Arina Olegovna^{1*} 
Glebova, Ekaterina Alekseevna¹ 
Savvateev, Dmitriy Vitalevich¹ 
Ambarzumian, Anzela Vardanovna² 

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² Vyatka State University, Kirov, Russia

melehin.em@edu.spbstu.ru (M.E.M.); mohirevaarina@mail.ru (M.A.O.); ekaterin.glk@gmail.com (V.I.I.); Savvateevdv1999@mail.ru (S.D.V.); anzhela.vardanovna@gmail.com (A.A.O.)

Correspondence: * email mohirevaarina@mail.ru; contact phone [+79229690863](tel:+79229690863)

Keywords:

FDS, visibility assessment, fire safety detector layout, BIM, exhaust ventilation modeling, smoke removal systems, Digital double, CFD

Abstract:

The existing fire extinguishing systems are not economically efficient enough and do not take into account the scenario of fire development. At the same time, fire and smoke detection systems significantly worsen safety, since they create an addiction to false positives for users of premises. This article discusses a method for extracting data from a BIM model and their relationship with the operational model of a building for calculating fire risks. As a result, a way to reduce them is presented, by redirecting the flows of people using a monitoring system and using an interdisciplinary transition to implement an industrial fire extinguishing system in civil construction. When setting tasks for automated scenario selection, it is necessary to take into account multifactorial mathematical models of linear programming with several criteria, where the main one is complete evacuation, and auxiliary ones are minimizing damage to human health, minimizing economic losses for the operating organization, and others.

1 Introduction

Современные высотные здания могут быть сконфигурированы в помещения с самыми разными техническими характеристиками. Эта ситуация создает разнообразную строительную среду с множеством переменных, которые затрудняют точное прогнозирование и мониторинг пожарной опасности. Поэтому разработка и внедрение комплексной системы предупреждения пожара и чрезвычайных ситуаций необходима для их эффективного предотвращения. [1-4]

Текущий уровень развития цифровых технологий позволяет моделировать поведение конструкций зданий на основании виртуальных испытаний, предупреждать, а не реагировать на неисправности функционирования здания. Мотивирована необходимость систематизации данных об объекте капитального строительства, для получения полного объема информации о здании и их дальнейшего использования в расчетах. Существует 2 способа получения данных об объекте капитального строительства. Первым является «Цифровой двойник» – напрямую связанная модель с фактически эксплуатируемым зданием, реализуемая через датчики сбора физических параметров и систему обратной связи управления. Вторым является «Информационная модель здания» - единая модель, выполненная на этапе проектирования. Поэтому при изначальном



создании цифровой модели совместно с эксплуатационной возможно учесть почти все факторы, влияющие на жизненный цикл здания. [5-7]

Алгоритм необходимый для зданий повышенного уровня ответственности должен предусматривать в себе заблаговременное моделирование всех возможных сценариев пожара, в том числе как здание, реализованное по проекту, так и в случае, когда здание построено с отклонением от проектной документации [8-11]. Из-за несовершенства технологий происходит завышение пожарных рисков в здании, что приводит к уменьшению функциональности, эргономики и удобству пребывания там людей. Поэтому одной из наиболее актуальных задач исследования пожарной безопасности является ее обеспечение без существующих на сегодня в нормах ограничений [12; 13].

При этом существуют различные системы учета выброса углекислого и угарного газов. В исследованиях [14-16] предлагается основа для моделирования тепловыделения сжиженного нефтяного газа и моделирования видимости эвакуируемых на пути выхода во время пожара с использованием эффективной вычислительной гидродинамической модели (CFD). Структура состоит из сценарного моделирования, оптимизированной компоновки детектора дыма, механической системы дымоудаления и анализа видимости. Моделирование CFD сначала проверяется с использованием экспериментальных данных. Затем рассматривается пример компоновки детектора, показывающий, что предложенный подход увеличивает видимость выходного тракта вдоль коридора здания во время выброса топлива и пожара. Или в работах [17;18] было смоделировано шесть сценариев пожара с различными конфигурациями заслонки, а также проанализированы результаты моделирования расхода заслонки, видимости и распределения температуры. При этом можно сделать вывод, что площадь заслонки мало влияет на дымоудаление пожара при ее величине более 3 м², но количество заслонок и расстояние между заслонками оказывают гораздо большее влияние на дымоудаление точечной вытяжной вентиляционной системы.

Так же в исследованиях [19-21] был разработан ряд сценариев при пожаре, направленных на инженерное применение центральной системы дымоудаления, с двусторонним сбалансированным дымоудалением или односторонним дымоудалением в направлении вверх или вниз. Результаты показали, что скорость потока имеет значительное влияние на задымление. Для различных размеров пожара разумная продольная индуцированная скорость может иметь небольшую разницу, когда соответственно принимаются различные режимы дымоудаления. Эти данные подтверждает исследование [22;23], где эффективность дымоудаления анализировалась путем сравнения влияния различных режимов открытия дымовых вентиляционных отверстий. В результате эффективность системы дымоудаления с открытыми двумя непрерывными нисходящими группами дымовых вентиляционных отверстий, была во многом такой же, как и у открытого двумя разнесенными нисходящими группами дымовых вентиляционных отверстий. Но они были более эффективны, чем системы, открывающие только одну нижележащую группу дымовых вентиляционных отверстий

Подобные исследования обеспечивают эффективную платформу для моделирования пожарного риска и оценки эффективности механизмов пожарной безопасности в зданиях, что также может быть полезно для повышения безопасности городской инфраструктуры. На основе полученной системы, спроектированной и проверенной, следует провести анализ рынка, а также предусмотреть потребность в энергоэффективности данной сети вентиляции и экономической выгоды от ее устройства [24-30].

Поэтому целью данной работы является определение экономически эффективного и рационального алгоритма обеспечения пожарной безопасности в современных, в том числе и высотных зданиях, с использованием систем цифровых двойников зданий и нейросетевого прогнозирования. Для реализации этой цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ существующих систем и методов автономного пожаротушения и выявления возгораний и задымлений.
2. Сопоставление существующих и перспективных возможностей использования цифровых двойников в области пожарной безопасности.
3. Обзор методов моделирования распространения опасных факторов пожара в том числе нейросетевые и другие современные методы численного анализа.
4. Составление алгоритма обеспечения пожарной безопасности на основе результатов приведенного анализа.

2 Materials and Methods

При формировании данных для расчета опасных факторов пожара возможно использовать 2 варианта получения исходной информации. Так как использование цифрового двойника невозможно из-за отсутствия реально построенного объекта, использовался метод переноса данных из BIM модели и их последующая обработка в программном комплексе «Pyrosim» и «Pathfinder». Для получения гидродинамической модели тепломассопереноса при горении использовалась программа «Pyrosim». Результат работы программы учитывался при расчете путей эвакуации в программе «Pathfinder». [31]



Рис. 1. Схема получения данных для моделирования сценария распространения опасных факторов пожара

Fig. 1. Data acquisition scheme for modeling the scenario of the spread of fire hazards

Для описания процесса нейтрализации опасных газов, выделяемых при пожаре, посредством добавления в них ацетатного медно-аммиачного раствора, использовалась схема очистки газа и регенерации ацетатного медно-аммиачного раствора с применением совмещенных регенераторов. [32]

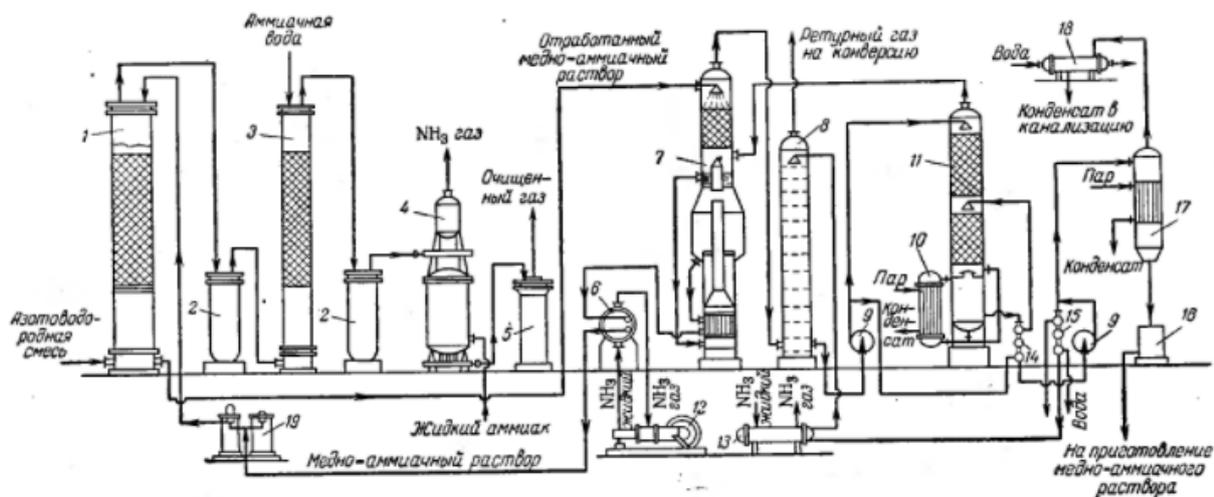


Рис. 2. Схема очистки газа и регенерации ацетатного медно-аммиачного раствора с применением совмещенных регенераторов

1 – скруббер для промывки медно-аммиачным раствором; 2 – брызгоотделители; 3 – скруббер для промывки аммиачной водой; 4 – испаритель; 5 – сепаратор; 6 – аммиачный холодильник; 7 – совмещенный регенератор; 8 – колонна отмывки ртутных газов; 9 – насосы; 10 – испаритель; 11 – отгонная колонна; 12 – аммиачный компрессор; 13 – аммиачный холодильник; 14 – теплообменник; 15 – холодильник; 16 – барометрический стакан; 17 – выпарной аппарат; 18 – конденсатор; 19 – рекуперационная машина

Fig. 2. Scheme of gas purification and regeneration of an acetate copper-ammonia solution using combined regenerators

1 – scrubber for washing with copper-ammonia solution; 2 – spray separators; 3 – scrubber for washing with ammonia water; 4 – evaporator; 5 – separator; 6 – ammonia refrigerator; 7 – combined regenerator; 8 – mercury gas washing column; 9 – pumps; 10 – evaporator; 11 – distillation column; 12 – ammonia compressor; 13 – ammonia refrigerator; 14 – heat exchanger; 15 – refrigerator; 16 – barometric glass; 17 – evaporation apparatus; 18 – condenser; 19 – recovery machine

3 Results and Discussion

При моделировании пожара и просчете опасных факторов, нельзя предусмотреть все возможные отклонения реальной ситуации от результатов аналитических расчетов. Простроенный алгоритм действий, отраженный на плане эвакуации, не учитывает наличие дефектов в уже эксплуатируемом здании, что пагубно может отразиться в случае наступления чрезвычайной ситуации. Для наглядности рассмотрим траекторию движения людей при пожаре в представленном здании.

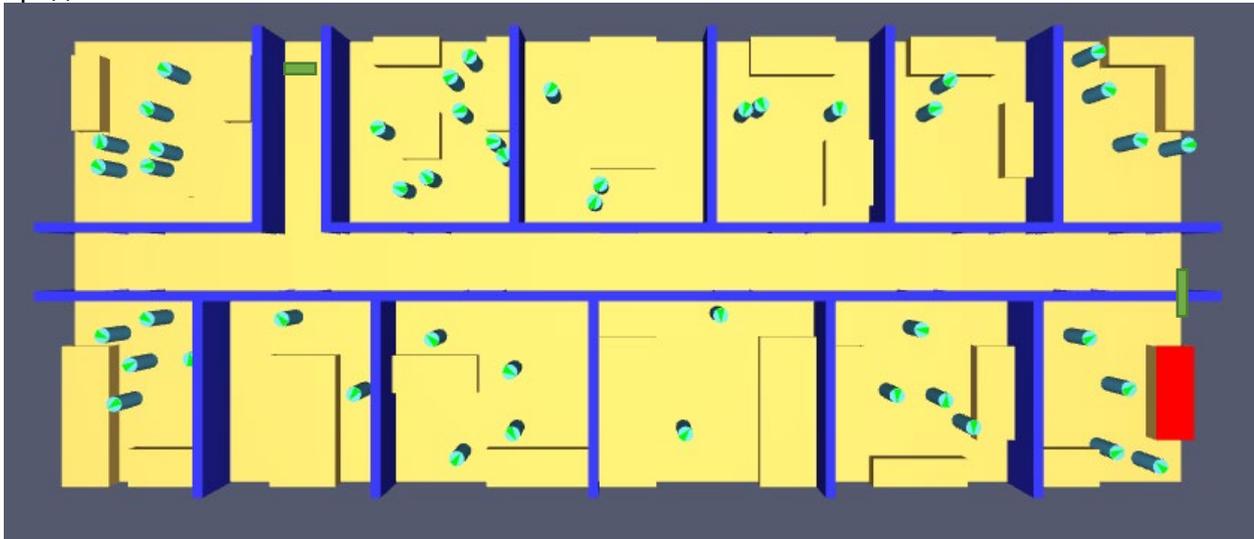


Рис. 3. Начальный этап эвакуации.

Fig. 3. The initial stage of evacuation.

На плане приняты следующие цветовые обозначения:

- красным обозначена зона возгорания
- зеленым обозначены эвакуационные выходы
- синим обозначены проектируемые стены

Симуляция дает нам информацию что в процессе протекания пожара один из эвакуационных выходов будет заблокирован повышающейся температурой и нарастающей концентрацией в воздухе продуктов горения. Алгоритм действия людей, задаваемый программой, не в полном объеме отражает фактическую модель поведения человека при пожаре. Перейдем к результатам выбора эвакуационного пути.

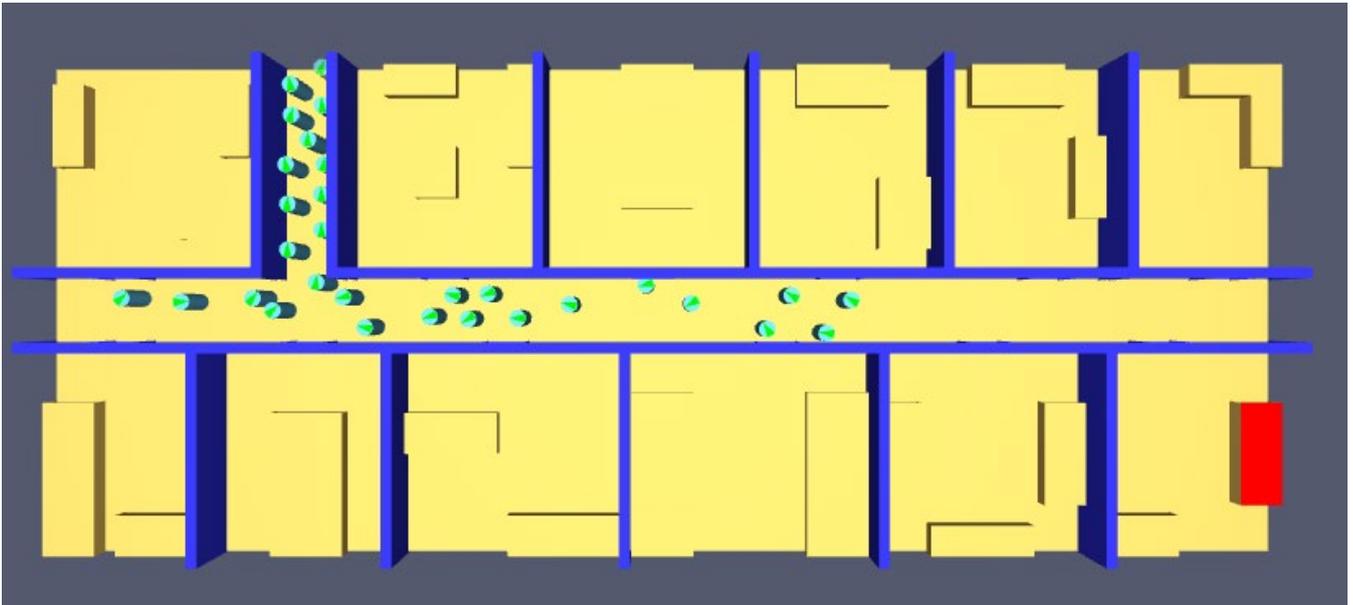


Рис. 4. Окончание эвакуации.

Fig. 4. The end of the evacuation.

Проведя отдельно расчет опасных факторов пожара, становится ясно чем руководствуется программа при выборе путей эвакуации. Ниже представлены изополя в отдельности по каждому из продуктов горения:

1. Изменение температуры с течением времени.

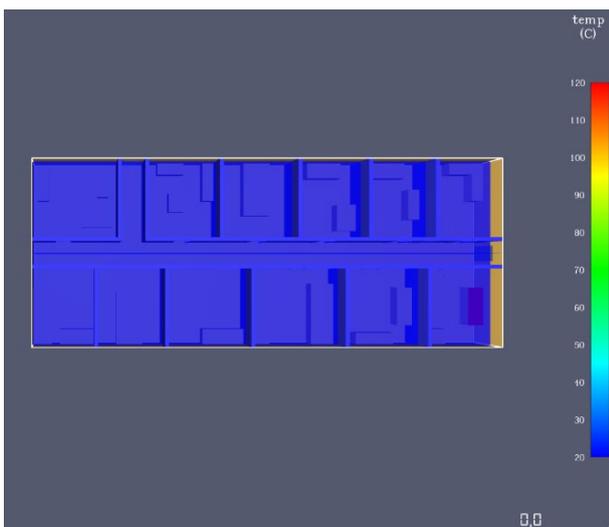


Рис. 5. Температура в начальный период.

Fig. 5. Temperature in the initial period.

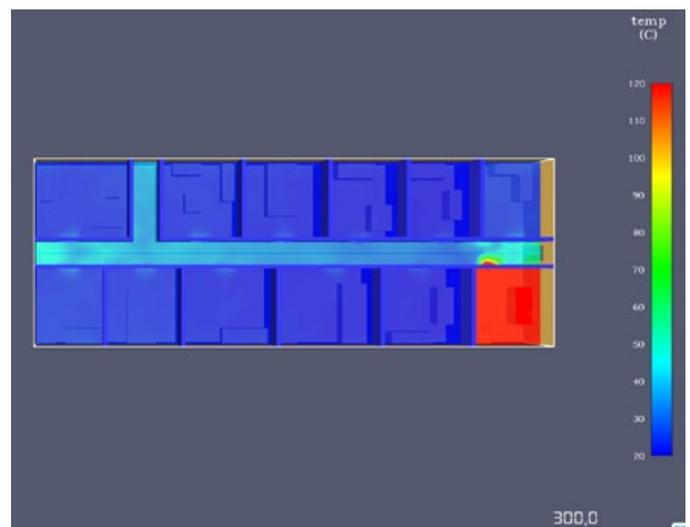


Рис. 6. Температура в конечный период.

Fig. 6. Temperature in the final period

Повышение температуры свыше 55°C приводит к блокированию доступа к пути эвакуации расположенного вблизи очага возгорания. Информирование об этом не может быть предусмотрено в реальной ситуации, что связано с потребностью в установке дополнительных датчиков фиксации изменений физических параметров и устройств оповещения на путях эвакуации.

2. Изменение концентрации кислорода с течением времени.

При снижении концентрации кислорода в воздухе с 23 до 16 % ухудшаются двигательные функции организма, и мускульная координация нарушается до такой степени, что самостоятельное движение людей становится невозможным, снижение концентрации кислорода до 9 % приводит к смерти через 5 мин.

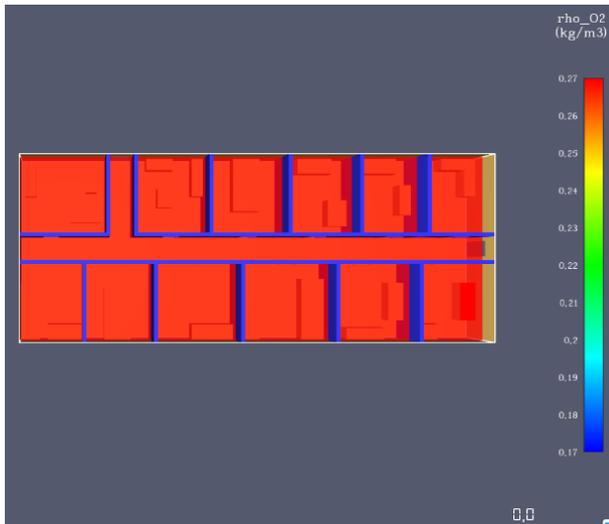


Рис. 7. Концентрация кислорода в начальный период.
Fig. 7. Oxygen concentration in the initial period.

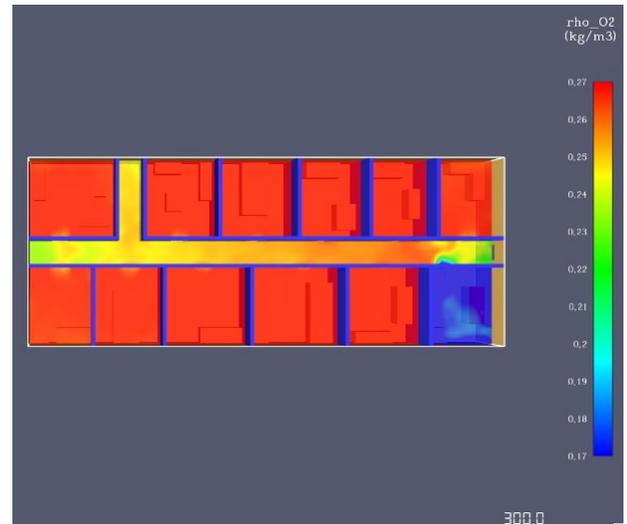


Рис. 8. Концентрация кислорода в конечный период.
Fig. 8. Oxygen concentration in the final period.

Концентрация кислорода в течении симуляции не опустилась до критического значения в 16%. Эта информация дает нам представление, что этот фактор не являлся решающим при блокировке одного из запасных выходов.

3. Изменение концентрации монооксида и диоксида углерода с течением времени

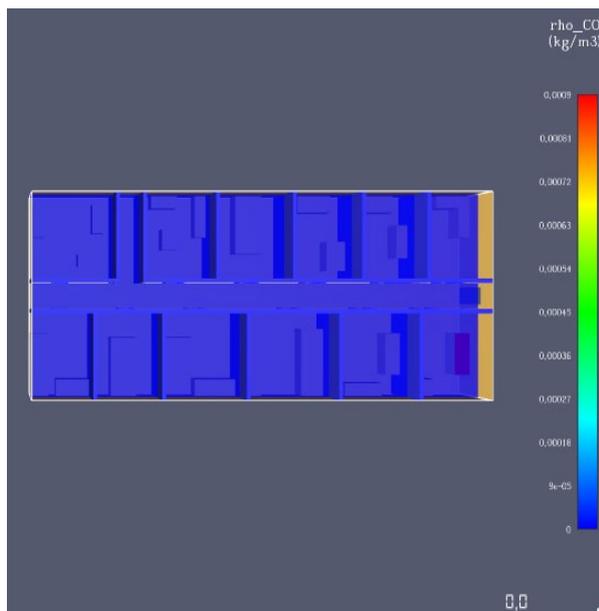


Рис. 9. Концентрация монооксида углерода в начальный период.
Fig. 9. The concentration of carbon monoxide in the initial period.

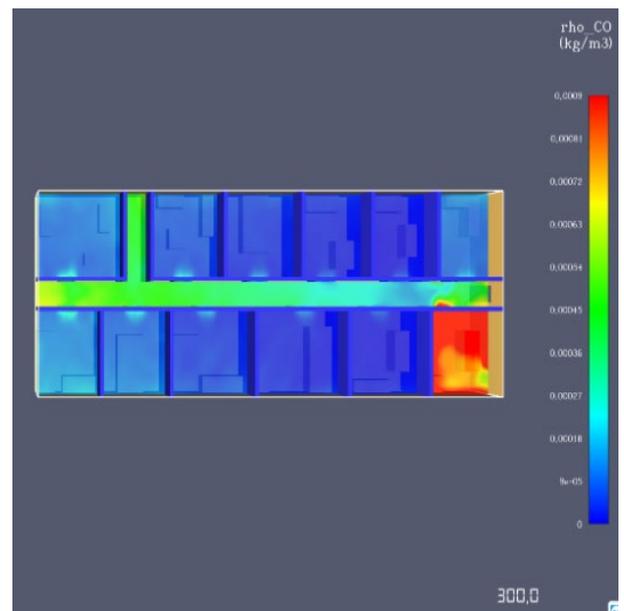


Рис. 10. Концентрация монооксида углерода в конечный период.
Figure 10. Carbon monoxide concentration in the final period.

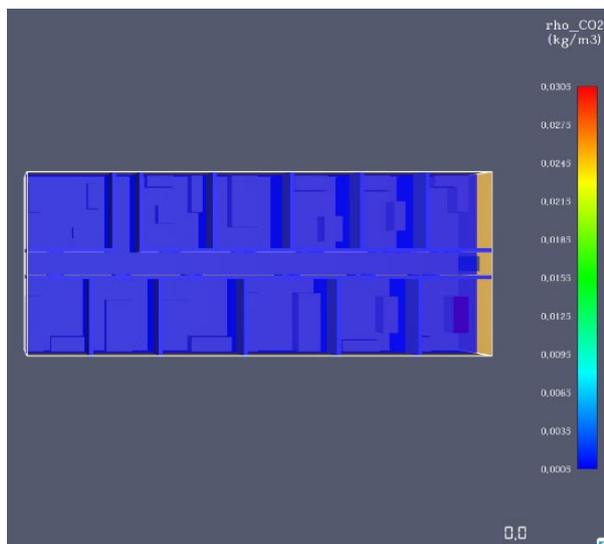


Рис. 11. Концентрация диоксида углерода в начальный период.

Fig. 11. The concentration of carbon dioxide in the initial period.

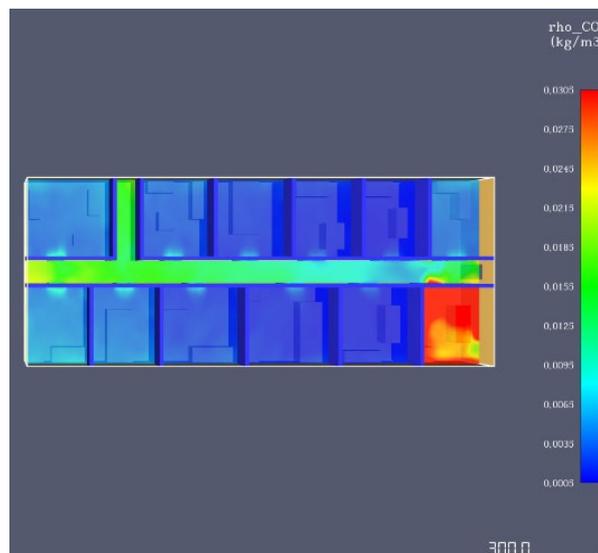


Рис. 12. Концентрация диоксида углерода в конечный период.

Fig. 12. The concentration of carbon dioxide in the final period.

Концентрации токсичных веществ в воздухе приводят к летальному исходу:

- 1,0 % окиси углерода (CO) – за 2–3 мин;
- 5 % двуокиси углерода (CO₂) – за 5 мин;

В представленном результате концентрация монооксида углерода составляет 0,0009 кг/м³, а концентрация диоксида углерода равна 0,0305 кг/м³. Что также символизирует нам о том, что доступ к одному из путей эвакуации стал недоступен.

Объединив все вышеизложенное, мы получаем те же исходные данные, что и программа поиска пути эвакуации. Основываясь на результатах анализа при корректировании путей эвакуации или построении схем пожаротушения и иных систем пожарной безопасности невозможно учесть один из важнейших факторов – поведения человека без оперативной донесенной информации об обстановке в любой момент времени и корректировки действий для достижения эвакуационного выхода.

Нехватку информации можно компенсировать расстановкой дополнительных датчиков к уже существующим для получения информации об изменении физических параметров, таких как температура, концентрация кислорода, оксидов углерода в воздухе и датчик нахождения человека в помещении. Увеличение стоимости проектирования и строительства здания при учете этих дополнений компенсируется полным мониторингом обстановки при пожаре и отклонение одного из вышеуказанных параметров сразу даст представление о местоположении очага возгорания, количестве людей, находящихся в зоне поражения и скорости увеличения продуктов горения.

Более подробно рассмотрим наличие датчика, фиксирующего нахождение людей в помещении. На начальном этапе горения система мониторинга здания получает полную информацию о помещении где началось возгорание, а дальше она, основываясь на заранее предусмотренном алгоритме и анализе исходных данных выбирает один из сценариев действий, который предусматривает активацию систем пожаротушения, оповещающих устройств и систем визуального оповещения о направлении к эвакуационному выходу. Предусмотренные заранее сценарии можно разделить на две основные группы:

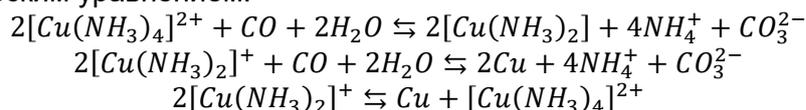
- в помещении присутствуют люди
- в помещении отсутствуют люди

Присутствие пользователей помещений накладывает ряд ограничений на используемые средства пожаротушения, в частности метод тушения различными газами, которые вытесняют кислород, являющийся топливом для поддержания горения. Поэтому активируются системы пожаротушения, использующие в своей основе безвредные для человека вещества.



Отсутствие людей снимает фактор вреда человеку, что позволяет более эффективно и быстро локализовать очаг пожара. Но проектирование двух систем пожаротушения внутри одного здания существенно увеличивает его стоимость проектных и строительных работ.

В работе предусмотрен междисциплинарный переход одного из видов тушения пожара, используемого в промышленных зданиях к гражданским зданиям. Суть метода заключается в установке для улавливания СО, ацетатным медно-аммиачным раствором, который подается в вакуумную комнату с собранным в нее дымом. Система запускается на основе анализа информации, полученной с датчиков. Возможность монтирования вакуумной камеры в потолочном пространстве не влечет за собой снижения полезной площади помещения. Соединив все расположенные в здании камеры в отдельную сеть с выводом в помещение отчистки «аммиачной воды» делает эту систему пожаротушения менее габаритной и сопоставимой в размерах с системой водоснабжения. Сам процесс поглощения оксида углерода описывается следующим химическим уравнением:



Продукты реакции со всех вакуумных камер по герметичному контуру попадают в помещение переработки где установлена принципиальная схема очистки газа и регенерации ацетатного медно-аммиачного раствора с применением совмещенных регенераторов представленная в разделе 2. Материалы и методы. Еще одним из преимуществ данной системы является ее процесс возвращения в состояние готовности, так как отчищенный раствор насыщается недостающими химическими элементами, себестоимость которых не велика.

4 Conclusions

По результатам анализа существующих систем и методов автономного пожаротушения и выявления возгораний и задымлений было выявлено, что они не могут быть в полной мере использованы совместно с эксплуатационными системами цифровых двойников и основанными на них современными методами обеспечения пожарной безопасности.

Было проведено сопоставление существующих и перспективных возможностей использования цифровых двойников в области пожарной безопасности. Выявлено два наиболее эффективных варианта совмещения: автоматизированный мониторинг в реальном времени пожарной ситуации в здании с возможностью обратной связи и корректировкой работы системы пожаротушения, более эффективное тушение пожара за счет применения специальных средств в помещениях или зонах где цифровой двойник на основе мониторинга показывает отсутствие людей.

Нейросетевые и другие современные методы численного анализа опираются на большой объем case study в части уже произошедших пожаров, а также на собранные базы результатов численного моделирования различных сценариев распространения огня и дыма. Результаты получаемые из подобных нейросетевых методов – выборка сценариев развития пожарной ситуации, достаточная для эффективного прогнозирования динамики развития пожара или задымления при любом возможном источнике возгорания.

Составлен алгоритм обеспечения пожарной безопасности:

- Построить эксплуатационную модель
- Подготовить необходимую выборку сценариев развития пожара и возможных последствий каждого сценария, полученную на основе предварительных расчетов.
- Подготовка необходимых систем пожаротушения адаптированных для работы с цифровыми двойниками зданий.
- Отработка и тестовые прогоны пожарных ситуаций для обучения системы подбору наиболее подходящего алгоритма действий, в зависимости от фактической динамики развития пожарной ситуации, а не только от начальных данных о возгорании



References

1. Chow, W. K., Chow, W. K. Application of the Zone Model FIRST on the Development of Smoke Layer and Evaluation of Smoke Extraction Design for Atria in Hong Kong. *Journal of Fire Sciences*. 1993. Volume 11. DOI: 10.1177/073490419301100405.
2. Toman S. Normativní novinky požární bezpečnosti staveb pro vzduchotechniku a požární větrání. *Vytapeni, Vetrani, Instalace*. 2018. Volume 27(2). Scopus: 2-s2.0-85044276951.
3. Santoso M. A., Bey Z., Nugroho Y.S., CFD Study on the Ventilation System and Shape Configuration of Underground Car Park in Case of Fire. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Volume 758. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.758.143.
4. Wang H., Dong W., Liang D. Performance-based design of smoke control and evacuation in a building atrium. *Procedia Engineering*. 2011. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.679.
5. M. Shan-jun, Z. Zhe, L. Dong, H. Zhi-jian. Engineering Simulation of Smoke Extraction Design in Atrium Fires of Student Union. *Procedia Engineering*. 2011. Volume 11. Pages 325-334. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.665.
6. P. Lin, Y. Zhang, Y. Si. A Numerical Study on the Impact of Vehicles' Blockage on the Performance of Semi-transversal Smoke Control System in Tunnel Fire. *Procedia Engineering*. 2016. Volume 135. Pages 248-260. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.120.
7. Y. Yang, B. Yang, Z. Bing. The Study on Influence of Water Mist Particle Size on Fire Smoke Migration with Longitudinal Ventilation in Road Tunnel. *Procedia Engineering*. 2018. Volume 211. Pages 917-924. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.093.
8. Wesseling M., Schmidt M., Müller D. Numerical robustness analysis of natural and mechanical smoke extraction systems for buildings. *International Journal of Ventilation*. 2019. Volume 18(2). DOI: 10.1080/14733315.2018.1432840.
9. Li S., Su C., Tsai K. A study on wind-induced smoke extraction systems for building fires. *MATEC Web of Conferences*. 2016. DOI: 10.1051/mateconf/20165102001.
10. Cai, N., Chow, W. K. Numerical studies on fire hazards of elevator evacuation in supertall buildings. *Indoor and Built Environment*. 2019. Volume 28(2). DOI: 10.1177/1420326X17751593.
11. Kanitz, A., Zehfuß, J. Conceptual optimization of smoke extraction in atria. *Bautechnik*. 2018. Volume 95(8). DOI: 10.1002/bate.201800046.
12. Valentin, J., Coudret, F., Gouardères, E., Lefer, W. Human behaviour modelling for simulating evacuation of buildings on fire. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2012. Volume 7145 LNCS. DOI: 10.1016/j.psep.2020.11.036.
13. Almanasra, S., Alshahrani, A. Alternative Real-time Image-based Smoke Detection Algorithm. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*. 2020. Volume 5(3). DOI: 10.25046/aj050316.
14. T. Baalisampang, E. Saliba, F. Salehi, V. Garaniya, L. Chen. Optimisation of smoke extraction system in fire scenarios using CFD modelling. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Volume 149. Pages 508-517. DOI: 10.1016/j.psep.2020.11.036.
15. H. Yang; S. Li, Numerical Investigation on the Effect of Mobile Smoke Ventilator on Fire-induced Smoke Extraction for Underground Platform in a High-speed Railway Station// *Procedia Engineering*. 2018. Volume 211. Pages 871-880. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.086.



16. Y.Qin, W. Huang, Y. Xiang, R. Zhang, P. Lu, X. Tan. Feasibility Analysis on Natural Smoke Extraction for Large Space Warehouse Buildings. *Procedia Engineering*. 2016. Volume 135. Pages 495-500. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.161
17. J. Yuan, Z. Fang, Z. Tang, Q. Li, J. Wang. Influence of smoke damper configuration on point extraction ventilation system of an urban tunnel. 2016. *Procedia Engineering*. Volume 135. Pages 99 – 106. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.085
18. X. Zhisheng, L. Yangyang, K. Rui, G. Junpeng, Y. Long. Study on the Reasonable Smoke Exhaust Rate of the Crossrange Exhaust Duct in Double-layer Shield Tunnel. *Procedia Engineering*. 2014. Volume 84. Pages 506-513. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.462.
19. X. Zhi-sheng, W. Shan. Influence Analysis of Effects of Longitudinal Induced Velocity on the Smoke Control under Central Smoke Extraction System in Tunnel Fire. 2013. *Procedia Engineering*. Volume 52, Pages 500-507. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.175.
20. X. Zhang, Z. Xu, T. Ni, J. Peng, J. Zeng, Q. Ran. Investigation on smoke temperature distribution in a double-deck tunnel fire with longitudinal ventilation and lateral smoke extraction. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. Volume 13. DOI: 10.1016/j.csite.2018.100375.
21. J. Yang; X. Pan; M. Hua. Study on the Flow-dynamic Characterization of the Lateral Mechanical Extraction System in Tunnel Fire. *Procedia Engineering*. 2018. Volume 211. Pages 888-896. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.088.
22. S. Liu, Y. Jiang, J. Chen, K. Li. Full-scale Experimental Research on the effect of Smoke Exhaust Strategies on Efficiency of Point Extraction System in an Underwater Tunnel. *Procedia Engineering*. 2016. Volume 166. Pages 362-372. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.561.
23. Y. Liu, S. Cassady. A modified critical velocity for road tunnel fire smoke management with dedicated smoke extraction configuration. *Case Studies in Fire Safety*. 2014. Volume 2. Pages 16-27. DOI: 10.1016/j.csfs.2014.09.001.
24. Kuti R., Zolyomi G., Kegyes-Brassai O. Assessing the impact of positive pressure ventilation on the building fire - A case study. *International Journal of GEOMATE*. 2018. Volume 15(48). DOI: 10.21660/2018.48.18042.
25. X. Jun-bin, Z. Cheng, Z. Jun-fei, C. Qing-quan, W. Jia-baoa. The Study on Influence Factors of the Mechanical Smoke Evacuation System in Atrium Buildings. *Procedia Engineering*. 2013. Volume 52, Pages 508-513. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.176
26. Kujime M., matsushita T., Tanaka T. Hand calculation method for air supply rates in vestibule pressurization smoke control system. *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*. 2000. Volume 65(531). DOI: 10.3130/aija.65.1_5.
27. Huang Y., Zhou X., Cao B., Yang L. Computational fluid dynamics-assisted smoke control system design for solving fire uncertainty in buildings. *Indoor and Built Environment*. 2020. Volume 20(1). DOI: 10.1177/1420326X19842370.
28. Huang H., Ooka R., Chen H., Kato S. Optimum design for smoke-control system in buildings considering robustness using CFD and Genetic Algorithms. *Building and Environment*. 2009. Volume 44(11). DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.02.002.
29. Park Y., Na J., Sung K., Ryou H. Numerical study on the effect of elevator movement on pressure difference between vestibule and living room in high-rise buildings. *Building Simulation*., 2019. Volume 12(2). DOI: 10.1007/s12273-018-0477-1.



30. Sung K., Shin H., Baek D., Ryou H. The effect of damper leakage and fire size on the performance of smoke control system in high-rise building. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. Volume 31(8). DOI: 10.1007/s12206-017-0750-8.
31. J. Dimyadi, M. Spearpoint. Sharing fire engineering simulation data using the IFC building information model. Conference: International Congress on Modelling and Simulation. 2010. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.9-1329.
32. Jun You W., Hyun Ko G., Ryou H. A study on the unsteady flow characteristics in a vestibule for an injection and pressurization smoke-control system. *Fire Safety Journal*. 2014. Volume 70. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.007.
33. Fryd, M., Brzezińska D., Dziubiński M. High rise buildings stairwells pressure differential systems tests and improvement solutions. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2021. Volume 42(1). DOI: 10.1177/0143624420964313.
34. Tan S., Weinert D., Joseph P., Moinuddin K. Impact of technical, human, and organizational risks on reliability of fire safety systems in high-rise residential buildings—applications of an integrated probabilistic risk assessment model. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. Volume 10(24). DOI: 10.3390/app10248918.
35. Tian X., Liu C., Zhong M., Numerical and experimental study on the effects of a ceiling beam on the critical velocity of a tunnel fire based on virtual fire source. *International Journal of Thermal Sciences*. 2021. Volume 159. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106635.
36. Jiao H., Ma Z., Hua W. The design of the control system of fire control and smoke extraction robot based on PLC. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1646/1/012093.