

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ НА ОПАСНОМ ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ОБЪЕКТЕ

А. В. Чернухин✉, Т. В. Савицкая, А. М. Сверчков, А. В. Дементенко

*Кафедра кибернетики химико-технологических процессов, chernukhin.a.v@muctr.ru;
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия*

Ключевые слова: информационная система эвакуации; модель распространения пламени; модель эвакуации; программное приложение; сбор данных.

Аннотация: Рассмотрена задача моделирования эвакуации с производственных объектов. Даны описания современных алгоритмов и моделей эвакуации, распространения огня и дыма. В среде программирования Delphi разработано программное приложение, предназначенное для моделирования эвакуации сотрудников в случае возникновения чрезвычайной ситуации с учетом распространения пламени и дыма, реализующее индивидуально-поточную модель. Представлена апробация программного приложения для различных случаев эвакуации.

Введение

В настоящее время активно продолжается автоматизация всех отраслей промышленного производства, которая приводит к усложнению инфраструктуры предприятия, представляющего многоуровневую информационно-техническую систему. Также, по статистическим данным ФГБУ ВНИИПО МЧС России, в период с 2017 по 2021 гг. число пожаров на производственных объектах, прямой материальный ущерб от них, а также число погибших неуклонно увеличивалось. Потому возникла необходимость в создании комплексной информационной системы, внедрение которой направлено на своевременную организацию и проведение эвакуации [1, 2].

Ключевой компонент такой системы – программное приложение, производящее моделирование эвакуации в реальном времени для определения оптимальных маршрутов эвакуации каждого из сотрудников. В Российской Федерации приказами МЧС № 382 [3] и № 404 [4] закреплены три модели, которые могут использоваться для моделирования эвакуации: упрощенная аналитическая, имитационно-стохастическая и индивидуально-поточная. Чтобы соответствовать законодательной базе и иметь возможность применения программного приложения для моделирования эвакуации на реальных объектах, необходимо выбрать для реализации одну из этих моделей.

Как показывает практика, для повышения точности моделирования эвакуации необходимо учитывать распространение пламени и дыма на предприятии в случае чрезвычайной ситуации (ЧС). Данные факторы могут выступать в качестве препятствий на отдельных эвакуационных путях, что может повлечь либо увеличение общего времени эвакуации, либо, в крайнем случае, невозможность эвакуации отдельных сотрудников из близкорасположенных к источнику возго-

рания помещений. Такие результаты моделирования повлекут модернизацию нагруженных эвакуационных маршрутов, что поможет в дальнейшем избежать жертв среди сотрудников [5, 6]. Поэтому в процессе разработки необходимо выбрать оптимальное свободно распространяемое программное обеспечение (ПО), реализующее модель распространения пламени и дыма на предприятии и внедрить его в работу программного комплекса.

Постановка задачи

Цель работы – построение специализированного ПО для моделирования эвакуации с опасных производственных объектов.

Для ее реализации поставлены и решены следующие задачи:

- 1) анализ отечественных аналогов на предмет использования в режиме реального времени;
- 2) разработка алгоритмов распространения пламени, дыма и эвакуации персонала;
- 3) реализация и апробация программных средств на примерах реальной эвакуации;
- 4) описание и сравнение полученных данных.

Разработанное программное приложение позволит моделировать эвакуацию с учетом распространения пламени и дыма, а также решать комплекс исследовательских задач. Например, при заданных условиях о местоположении и количестве сотрудников, очаге возгорания, расположении и числе эвакуационных выходов можно провести комплексный анализ различных сценариев эвакуации.

Анализ отечественных аналогов

Для анализа актуальности данной разработки проведен анализ отечественных аналогов разрабатываемого комплекса:

1) Urban (разработчик – «Инвест Лайн +»), реализующий индивидуально-поточную модель. По итогам моделирования не проводится оптимизация полученных значений. Обладает доступным и интуитивно-понятным интерфейсом. Его время, затрачиваемое на проведение стандартного расчета пятиэтажного объекта, принимается за эталон для оценки других моделей;

2) FireCat, реализующий индивидуально-поточную модель, имеет сложный интерфейс и слишком высокую стоимость. Время, затрачиваемое на проведение стандартного расчета (пятиэтажный объект), на 30 % выше аналогов;

3) TOXI+Risk, реализующий упрощенную аналитическую модель. С использованием данной модели определяется расчетное время эвакуации людей из помещений и зданий по расчету времени движения одного или нескольких людских потоков через эвакуационные выходы от наиболее удаленных мест размещения людей. Время, затрачиваемое на проведение стандартного расчета, на 30 % выше аналогов;

4) Fenix+ (разработчик – «Современные программные технологии»), обладающий самым мощным инструментарием, включающим возможность моделирования пожара и распространения опасных веществ, но имеющий наибольшую стоимость из всех. Время, затрачиваемое на проведение стандартного расчета, на 15 % выше аналогов.

Следовательно, ни один из программных комплексов из-за разных причин не может использоваться в комплексной информационной системе эвакуации в реальном времени, а применяется для предварительных оценок соответствия здания требованиям пожарной безопасности МЧС.

Описание разработанных алгоритмов моделирования эвакуации

В рамках разработки программного приложения по моделированию эвакуации реализуется индивидуально-поточная модель, так как она наиболее точно описывает процесс движения каждого отдельного сотрудника в потоке и, следовательно, полученные при ее использовании результаты будут значительно лучше коррелировать с реальным временем эвакуации. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1, где даны следующие обозначения: i – id-сотрудника; j – id-участка, на котором он находится; m – число участков; k – количество сотрудников; t^i – реальное время начала эвакуации; t^3 – время задержки, dt – приращение по времени (принимается равным 0,25 с); z – количество эвакуировавшихся (пересекших последний участок маршрута).

Для моделирования эвакуации предварительно задаются всевозможные ее маршруты с производственного объекта, разбивающиеся на число участков j (могут быть как наклонными, так и горизонтальными), имеющие длину a и ширину b , которые указываются равными проектным значениям. Длина участка в дверном проеме принимается равной нулю.

При моделировании используются заранее заданные габариты человека, которые содержатся в базе данных: эллипс, оси которого отображают ширину в плечах и толщину человека соответственно и координаты каждого сотрудника x_i – расстояние от центра эллипса до конца эвакуационного участка, на котором он находится (берутся из базы, в которую записываются с «умного датчика») [7].

Плотность однородного людского потока на j -м участке пути $D_{vj}(t)$ определяется по формуле

$$D_{vj}(t) = \frac{N_j f dt}{a_j b_j}, \quad (1)$$

где N_j – количество людей на j -м участке, человек; f – площадь горизонтальной проекции человека, m^2 ; dt – временной интервал, с; a_j, b_j – длина и ширина j -го участка пути соответственно, м.

Пропускная способность каждого участка пути вычисляется по формуле

$$Q_j(t) = \frac{q_j(t) c_j dt}{60 f}, \quad (2)$$

где $q_j(t)$ – интенсивность движения на выходе с j -го эвакуационного участка в момент времени t , м/мин; c_j – ширина выхода с j -го эвакуационного участка, м.

Плотность потока перед каждым человеком определяется по формуле

$$D_j(t) = \frac{(n(t)-1)f}{b\Delta x}, \quad (3)$$

где $n(t)$ – количество людей в группе в момент времени t , человек; Δx – разность координат последнего и первого человека в группе, м.

В момент времени t определяется число людей z с отрицательными координатами $x_i(t)$. Если значение $z \leq Q_j(t)$, то все m человек переходят на следующий эвакуационный участок. Если значение $z > Q_j(t)$, то число человек, равное значению $Q_j(t)$, переходят на следующий эвакуационный участок, а число человек, равное значению $(m - Q_j(t))$, не переходят на следующий эвакуационный участок и их координатам присваиваются значения $x_i(t) = 0,25r + 0,25$, где r – номер ряда,

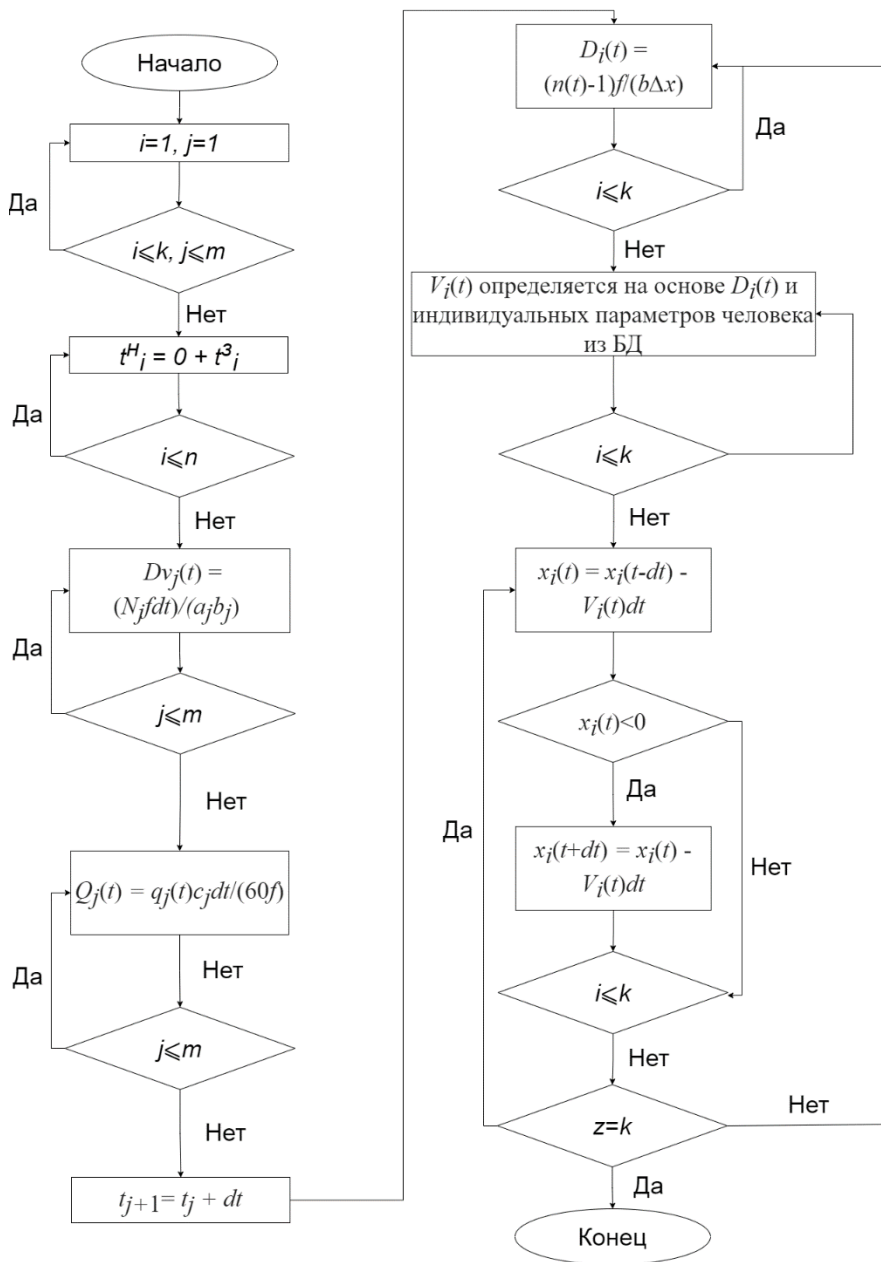


Рис. 1. Блок-схема алгоритма индивидуально-поточной модели

в котором будут находиться люди (максимально возможное количество человек в одном ряду для каждого эвакуационного участка определяется перед началом расчетов как отношение ширины участка b_j к средней ширине человека в плечах). Таким образом, возникает скопление людей перед выходом с эвакуационного участка. На основе заданных начальных условий (начальных координат людей, параметров эвакуационных участков) определяются плотности людских потоков на путях эвакуации и пропускные способности выходов с эвакуационных участков.

Далее, в момент времени $t_j = t_{j-1} + dt$ определяется наличие опасных факторов пожара (**ОФП**) на путях эвакуации. В зависимости от этого выбирается направление движения каждого человека и вычисляется новая координата каждого человека

$$x_i(t) = x_i(t - dt) - V_i(t) dt, \quad (4)$$

где $x_i(t - dt)$ – координата i -го человека в предыдущий момент времени, м; $V_i(t)$ – скорость i -го человека в момент времени t , м/с.

Скорость i -го человека $V_i(t)$ в момент времени t определяется по приложению к методике в зависимости от локальной плотности потока, в котором он движется, $D_i(t)$ и типа эвакуационного участка. После этого снова определяются плотности людских потоков на путях эвакуации и пропускные способности выходов. Затем вновь дается приращение по времени dt и определяются новые координаты людей с учетом наличия ОФП на путях эвакуации в данный момент времени. Далее процесс повторяется. Расчеты проводятся до тех пор, пока сотрудники не будут эвакуированы из здания.

В качестве модели распространения пламени и дыма используется Fire Dynamics Simulator (**FDS**). Модель разработана совместно Национальным институтом стандартов и технологий США (*англ.* National Institute of Standards and Technology (**NIST**)) и VTT Техническим исследовательским центром Финляндии (*англ.* VTT Technical Research Centre).

Причем, FDS использует гидродинамическую модель для вычисления перемещения воздушных потоков, вызванных пожаром. Для этого решаются уравнения Навье–Стокса, описывающие низкоскоростные потоки, вызванные изменением температуры, позволяющие рассчитать распространение дыма и распределение температуры [8]:

$$\partial \vec{u} / \partial t = -(\vec{u} - \nabla) \vec{u} - (1 - \rho) \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F}, \quad (5)$$

где $\partial \vec{u} / \partial t$ – изменения скорости жидкости в точке пространства (рассчитывается для каждой частицы); $-(\vec{u} - \nabla) \vec{u}$ – перемещение жидкости в пространстве; $(1 - \rho) \nabla p$ – давление, оказываемое на частицу (ρ – коэффициент плотности жидкости); $\nu \nabla^2 \vec{u}$ – вязкость среды (ν – коэффициент вязкости); \vec{F} – внешние силы, применяемые к жидкости.

Первая версия FDS выпущена в 2000 г. Данная модель широко используется как для разработки противопожарных систем, так и для предсказания распространения пожаров в жилых и производственных помещениях. Причем FDS может быть использована для анализа различных стратегий тушения пожаров, оценки влияния конструкционных материалов на поведение огня и определения зон риска, а также для оценки пожарной безопасности новых зданий и разработки стратегий по улучшению пожарной безопасности в уже существующих объектах. Кроме этого, программа FDS распространяется бесплатно и является общественным достоянием.

Реализация и апробация программных средств

В рамках предыдущих работ по исследуемой тематике разработаны прототип «умного датчика», способный в реальном времени собирать информацию о состоянии производственного объекта, и база данных, в которой, кроме данных с датчиков, содержатся все параметры, необходимые для моделирования эвакуации [9].

Программное обеспечение реализовано с использованием императивного, структурированного, объектно-ориентированного, высокоуровневого языка программирования Delphi в среде Embarcadero RAD Studio 10 Berlin – интегрированной среде разработки, которая предназначена для создания приложений для различных платформ, таких как Windows, macOS, iOS, Android и Linux. С помощью визуального редактора форм разработчики могут создавать пользовательские интерфейсы, настраивая элементы управления. RAD Studio поддерживает несколько языков программирования, включая Delphi, C++ и C#. Это означает, что разработчики могут выбирать наиболее подходящий язык для задач, а также комбинировать их в рамках одного проекта. Кроме того, часть кода, написанная на одном языке, может быть повторно использована в других частях приложения, что позволяет существенно упростить разработку.

При работе с программой необходимо выбрать: конкретный этаж, на котором происходит эвакуация; сотрудников (можно выбрать как всех, так и только конкретных для удобства отображения); дату проведения эвакуации и конкретное помещение. Далее выбирается модель, по которой проводится моделирование эвакуации, так как ранее, помимо индивидуально-поточной, реализована упрощенная аналитическая модель. После нажатия на кнопку «Расчет» необходимо подождать до нескольких минут, в зависимости от условий моделирования. Далее на подложке схемы отобразятся все индивидуальные маршруты работников и теоретическое и реальное время эвакуации.

Описание и сравнение полученных результатов

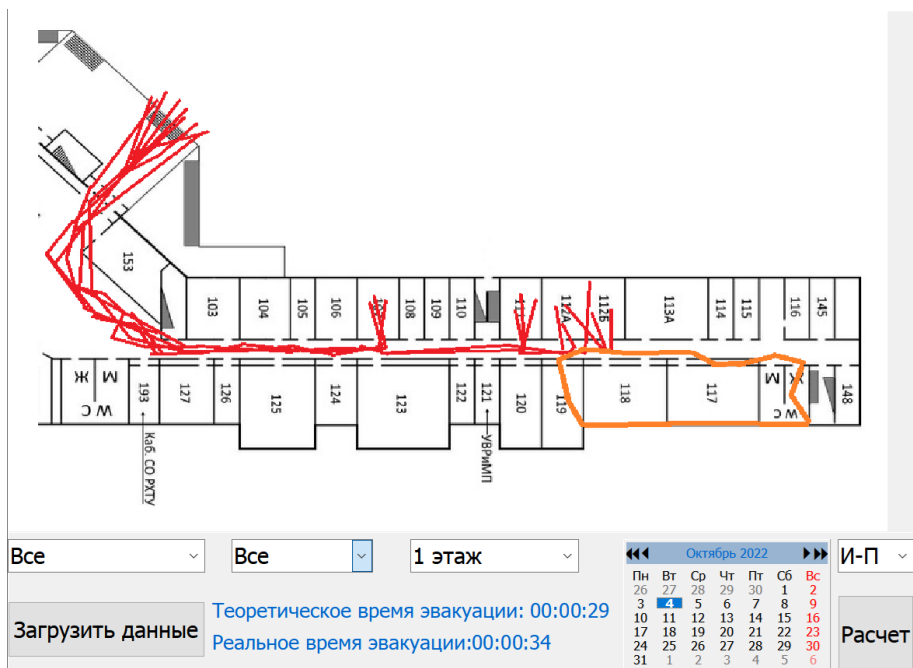
Проведем моделирование эвакуации из помещений 1126, 112а, 111 и 107 (рис. 2). Для этого заранее собраны данные о реальной эвакуации (маршрутах перемещения и времени) с помощью разработанного мобильного приложения, отслеживающего перемещение сотрудников во время эвакуации [9], результаты работы которого представлены на плане. Также для эксперимента проведено моделирование распространения пламени и дыма программным комплексом FDS, результатами которого является 3D-модель распространения огня и дыма в помещении во времени.

Предварительно проводится автоматическая разметка подложки со схемой помещения, поэтому каждый пиксель получает координаты X и Y , а точки, из которых формируется граница трехмерного представления модели пламени исключением координаты Z , переносятся на плоскость для удобства отображения и отмечаются на плане в виде замкнутой линии. Такие границы отображают области поражения на плане и позволяют автоматически анализировать возможное перекрывание маршрутов эвакуации во времени. Моделирование проведено для эвакуации 25 сотрудников, когда пожар начался в 117 помещении.

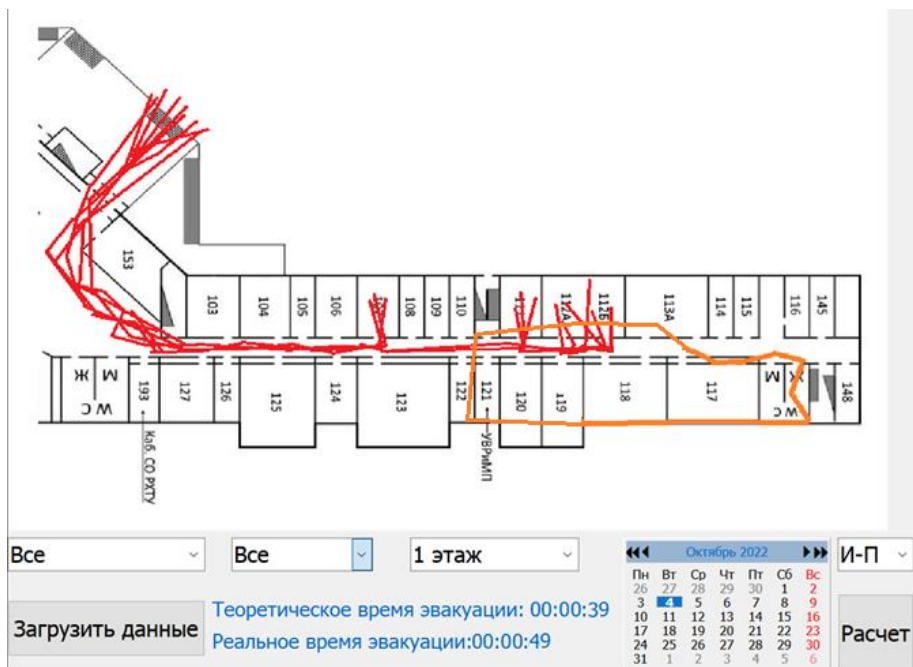
Можно наблюдать, что моделируемое время эвакуации практически не отличается от реального и из технического отчета следует, что простоев и погибших во время такой эвакуации не будет. Число погибших вычисляется по методике вычисления условной вероятности поражения человека [10].

Далее проведены шесть численных экспериментов, данные по которым отображены в сводной табл. 1. Для экспериментов 1 – 3 теоретическое время моделируется на основе индивидуально-поточной модели с учетом распространения пламени и дыма, 4 – 6 – без его учета.

Для случая эвакуации 25 сотрудников и наличия источника пожара в 117 помещении число погибших равняется 0, при расположении источника в помещении 123 время эвакуации растет, так как в дверном проеме между помещениями 112а и 112б происходит задержка из-за наличия области поражения пламенем. Также из-за этого вероятность смерти последнего эвакуирующего сотрудника будет близка к 100 %. В случае третьего эксперимента область поражения перекрывает



а)



б)

Рис. 2. Результаты моделирования для сценариев 1 (а) и 5 (б)

дверной проем между помещениями 106 и 107, расположенный еще ближе к выходу из здания, потому время задержки возрастает и высока вероятность гибели уже двух сотрудников.

Таблица 1

Сравнение результатов моделирования эвакуации

Эксперимент	Время эвакуации		Число эвакуирующихся	Расположение источника пожара	Число погибших
	теоретическое	реальное			
1	00:00:29	00:00:34	25	117	0
2	00:00:35	00:00:42		123	1
3	00:00:45	00:00:51		127	2
4	00:00:27	00:00:34		117	0
5	00:00:33	00:00:42		123	
6	00:00:43	00:00:51		127	

В экспериментах 4 – 6 показательным является то, что время отличается незначительно, но использование только индивидуально-поточной модели ведет к грубой ошибке подсчета числа жертв, так как не учитываются динамически образующиеся преграды на путях эвакуации.

Заключение

Таким образом, с использованием разработанной программы по моделированию эвакуации исследованы различные сценарии развития чрезвычайной ситуации. Результаты исследования могут использоваться для усовершенствования эвакуационной системы объекта.

В текущем виде разработанное программное приложение является эффективным средством для решения учебных и научно-исследовательских задач, например исследования влияния различных факторов на вероятность поведения успешной эвакуации. Для дальнейшего использования в комплексной информационной системе эвакуации необходимо усовершенствовать индивидуально-поточную модель эвакуации с учетом большего варьирования параметров моделирования.

Список литературы

1. Lee, H.-Y. A Planning Model for Evacuation in Building / H.-Y. Lee, H.-H. Tseng // International Journal of Social, Management, Economics and Business Engineering. – 2014. – Vol. 8, No. 10. – P. 2937 – 2941.

2. Wan, S. Dynamic Differential Evolution for Emergency Evacuation Optimization / S. Wan // Advances in Swarm Intelligence, Lecture Notes in Computer Science. – 2014. – Vol. 8795. – P. 392 – 400.

3. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС РФ от 30.06.2009 № 382 в редакции от 12.12.2011. – Текст : электронный. URL : [http://fire-audit.su/d/514375/d/32.prikaz-mchs-rf-ot-30-iyunya-2009-g.pdf/](http://fire-audit.su/d/514375/d/32.prikaz-mchs-rf-ot-30-iyunya-2009-g.pdf) (дата обращения: 20.06.2023).

4. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утверждена приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404) // Декларирование пожарной безопасности и оценка пожарного риска : сб. документов. Серия 19. Вып. 2. Ч. 4. Нормативные правовые документы по оценке пожарного риска, методики и примеры. – М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 288 с.

5. Колодкин, В. М. Программные алгоритмы, реализующие модель движения людских потоков в системе управления эвакуацией людей из здания /

В. М. Колодкин, М. Э. Галиуллин // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 10. – С. 75 – 85. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.75-85

6. Колодкин, В. М. Алгоритмы и модели системы управления эвакуацией людей при пожаре в здании / В. М. Колодкин, Б. В. Чирков // Безопасность в техносфере : X Междунар. конф. (Ижевск, 19 апреля 2016 г.). – Ижевск, 2016. – С. 28 – 43.

7. Чернухин, А. В. Умные датчики и база данных как элементы информационной системы эвакуации / А. В. Чернухин, А. М. Сверчков, Т. В. Савицкая // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 6(229). – С. 154 – 156.

8. Описание модели FDS. – Текст : электронный. URL : http://fds.sitis.ru/docs/FDS6_1_Mathematical_Model.pdf (дата обращения 07.06.2023).

9. Чернухин, А. В. Комплекс программных средств информационной системы по эвакуации персонала предприятия / А. В. Чернухин, А. М. Сверчков // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 1(197). – С. 48 – 50.

10. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : приказ МЧС РФ от 25 марта 2009 г. № 182 в редакции от 09.12.2010. – Текст : электронный. – URL : <https://base.garant.ru/195520/> (дата обращения: 20.06.2023).

The Development of a Software Application for Simulation of Fire Evacuation at a Hazardous Production Facility

A. V. Chernukhin✉, T. V. Savitskaya, A. M. Sverchkov, A. V. Dementienko

Department of Cybernetics of Chemical Technological Processes, chernukhin.a.v@muctr.ru; D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

Keywords: evacuation model; flame propagation model; evacuation information system; data collection; software application.

Abstract: The problem of modeling evacuation from industrial facilities is considered. Modern algorithms and models of evacuation, the spread of fire and smoke are described. In the Delphi programming environment, a software application has been developed to simulate the evacuation of employees in the event of an emergency, taking into account the spread of flame and smoke, which implements an individual flow model. Approbation of the software application for various cases of evacuation is presented.

References

1. Lee H.-Y., Tseng H.-H. A Planning Model for Evacuation in Building, *International Journal of Social, Management, Economics and Business Engineering*, 2014, vol. 8, no. 10, pp. 2937-2941.

2. Wan S. Dynamic Differential Evolution for Emergency Evacuation Optimization. *Advances in Swarm Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, 2014, vol. 8795, pp. 392-400.

3. available at: <http://fire-audit.su/d/514375/d/32.prikaz-mchs-rf-ot-30-iyunya-2009g.pdf/> (accessed 20 June 2023)

4. [The methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities (approved by order of the Russian Emergencies Ministry of July 10, 2009 No. 404)], *Deklarirovaniye pozharnoy bezopasnosti i otsenka pozharnogo riska : sb. dokumentov. Normativnyye pravovyye dokumenty po otsenke pozharnogo riska, metodiki i primery* [Declaration of fire safety and fire risk assessment: a collection of documents. Regulatory legal documents on fire risk assessment, methods and examples], Series 19, Issue 2, Part 4, Moscow: ZAO NTTTS PB, 2010, 288 p. (In Russ.)

5. Kolodkin V.M., Galiullin M.E. [Software algorithms that implement the model of the movement of human flows in the control system for the evacuation of people from the building], *Pozharovzryvbezopasnost* [Fire and Explosion Safety], 2019, vol. 25, no. 10, pp. 75-85. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Kolodkin V.M., Chirkov B.V. [Algorithms and models of people evacuation control system in case of fire in a building], *Bezopasnost' v tekhnosfere: X Mezhdunar. konf.* [Security in the Technosphere: X International Conference] (Izhevsk, 19 Apr. 2016), Izhevsk: 2016, pp. 28-43. (In Russ.)

7. Chernukhin A.V., Sverchkov A.M., Savitskaya T.V. [Smart sensors and database as elements of an evacuation information system], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2020, vol. 34, no. 6(229), pp. 154-156. (In Russ., abstract in Eng.)

8. available at: http://fds.sitis.ru/docs/FDS6_1_Mathematical_Model.pdf (accessed 07 June 2023).

9. Chernukhin A.V., Sverchkov A.M. [A complex of software tools for the information system for the evacuation of enterprise personnel], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2018, vol. 32, no. 1(197), pp. 48-50. (In Russ., abstract in Eng.)

10. available at: <https://base.garant.ru/195520> (accessed 07 June 2023).

Entwicklung einer Software-Anwendung für die Modellierung der Evakuierung im Brandfall in einer gefährlichen Industrieanlage

Zusammenfassung: Es ist das Problem der Modellierung der Evakuierung aus Produktionsanlagen betrachtet. Es sind Beschreibungen moderner Algorithmen und Modelle zur Evakuierung, Brand- und Rauchausbreitung gegeben. In der Delphi-Programmierungsumgebung ist eine Softwareanwendung entwickelt, um die Evakuierung von Mitarbeitern im Notfall unter Berücksichtigung der Flammen- und Rauchausbreitung zu simulieren und ein individuelles Strömungsmodell zu implementieren. Es ist die Approbation der Softwareanwendung für verschiedene Evakuierungsfälle vorgestellt.

Élaboration d'une application logicielle pour simuler l'évacuation lors d'un incendie dans une installation de production dangereuse

Résumé: Est examinée la tâche de simulation d'évacuation des installations de production. Sont données des descriptions d'algorithmes et de modèles modernes d'évacuation, de propagation du feu et de fumée. Dans l'environnement de programmation Delphi est élaboré une application logicielle conçue pour modéliser l'évacuation des employés en cas d'urgence en tenant compte de la propagation des flammes et de la fumée, mettant en œuvre un système de flux personnalisé. Est présentée la validation de l'application logicielle pour divers cas d'évacuation.

Авторы: *Чернухин Артём Валерьевич* – аспирант кафедры кибернетики химико-технологических процессов; *Савицкая Татьяна Владимовна* – доктор технических наук, профессор кафедры кибернетики химико-технологических процессов; *Сверчков Андрей Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры кибернетики химико-технологических процессов; *Дементюенко Андрей Владимирович* – ассистент кафедры кибернетики химико-технологических процессов, ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д. И. Менделеева», Москва, Россия.