

© 2022 г. А.Д. ЦВИРКУН, д-р техн. наук (tsvirkun@ipu.rssi.ru),
А.Ф. РЕЗЧИКОВ, чл.-корр. РАН (rw4cy@mail.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва),
А.А. САМАРЦЕВ (samaand@yandex.ru),
В.А. ИВАЩЕНКО, д-р техн. наук (info@iptmuran.ru),
А.С. БОГОМОЛОВ, д-р техн. наук (bogomolov@iptmuran.ru),
В.А. КУШНИКОВ, д-р техн. наук (kushnikoff@iptmuran.ru)
(Федеральный исследовательский центр
«Саратовский научный центр Российской академии наук»),
Л.Ю. ФИЛИМОНЮК, д-р техн. наук (filimonjukleonid@mail.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

СИСТЕМА ИНТЕГРИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА И ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ИЗ ПОМЕЩЕНИЙ

Представлены разработанная интегрированная математическая модель и реализующий ее программно-информационный комплекс для совместного моделирования распространения опасных факторов пожара и стихийной эвакуации людей из помещений сложной конфигурации. Распространение огня, тепла и дыма моделируется на основе принципа клеточных автоматов. Для моделирования процесса эвакуации используется разработанная мультиагентная модель, учитывающая физические характеристики и поведение людей при столкновениях.

Ключевые слова: мультиагентная модель, интеллектуальный агент, эвакуация людей, чрезвычайные ситуации, пожар, клеточный автомат.

DOI: 10.31857/S0005231022050038, EDN: AVHDT0

1. Введение

Значительное количество пострадавших при пожарах в помещениях обуславливается сочетанием повышенной концентрации продуктов горения и ограничения возможности эвакуации. Эти ограничения связаны с особенностями строений и недостатками в их подготовке к эксплуатации. Необходимой частью подготовки помещений к безопасной эксплуатации является моделирование возможных опасных ситуаций с использованием современных вычислительных средств. Для анализа процессов эвакуации и распространения опасных факторов пожара (ОФП) разработано достаточно много математических моделей. В частности, распространение ОФП — огня, тепла, дыма и др. анализируется в [1–7], процессы эвакуации людей из помещений — в [8–16]. При этом в используемых в настоящее время решениях для моделирования пожара, как правило, применяются полевые модели, для моделирования эвакуации — модели индивидуально-поточного типа. В [17] рассмотрен комплекс

аппаратно-программных средств FDS+Evac, использующих полевую модель эвакуации на основе концепции социальных сил. Такая модель достаточно сложна с вычислительной точки зрения в случае помещений больших размеров и ограниченно применима к анализу такого стихийного процесса, как эвакуация при пожаре. Другим недостатком модели в FDS+Evac является ограничение на ширину проемов — не менее 0,7 м. Кроме того, конфигурация помещения во время эвакуации рассматривается как постоянная, что не всегда соответствует действительности.

Модель эвакуации [9] также основана на концепции социальных сил, но при этом предполагает, что люди пытаются избегать столкновений друг с другом и с препятствиями. Тем не менее, остальные недостатки модели социальных сил сохраняются. Также не рассматривается влияние пожара на процесс эвакуации из помещений сложной конфигурации.

В целом, как показывает анализ известных систем, они имеют следующие основные ограничения:

- не учитываются физические аспекты поведения людей при эвакуации;
- не учитываются сложная конфигурация и возможность ее изменения во время пожара;
- математическое моделирование с использованием этих систем оказывается достаточно ресурсоемким.

При этом следует отметить, что процессы эвакуации и распространения ОФП оказывают друг на друга определенное влияние, которым нельзя пренебрегать. Поэтому для достижения более точной и адекватной оценки результатов возможной эвакуации при пожаре требуется совместное использование моделей распространения пожара и эвакуации в единых программно-информационных комплексах.

2. Постановка задачи, предлагаемые модели и методы решения

Для более адекватного моделирования процесса эвакуации при пожаре в помещении предлагается разработать новые модели развития пожара и процесса эвакуации, интегрированную модель этих процессов и построить программный комплекс, реализующий разработанные модели.

2.1. Модель распространения огня

Процесс распространения огня будем моделировать с использованием аппарата клеточных автоматов. Предположим, что помещение в декартовой системе координат xOy разбито сетью C на клетки со стороной dl (для моделирования бралось $dl = 0,05$ м). Тогда $C = \{c_{ij} | 0 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m\}$ — разбивка помещения на клетки в количестве n, m по горизонтали и вертикали; c_{ij} — клетка с координатами (i, j) .

Введем в рассмотрение следующие множества: NC — клетки, в которых невозможно горение (негорючий материал); I_t — клетки, в которых горение

возможно (горючий материал), но в данный момент t не началось; B_t — горящие клетки; F_t — клетка выгорела и больше не будет гореть. Множество NC не зависит от времени, остальные множества меняются со временем. Полагаем, что в любой момент модельного времени каждая рассматриваемая клетка входит ровно в одно из перечисленных множеств.

Распространение пожара в момент $t + 1$ зависит от вероятности P_{ij}^t возгорания внутри клетки, находящейся в состоянии I_t , с учетом ее характеристик и горения соседних клеток. Вероятность возгорания клетки может быть определена по [18]

$$P_{ij}^t = v_{ij} f_{ij}^t dt / 4dl,$$

где v_{ij} — линейная скорость распространения огня для клетки c_{ij} ; f_{ij}^t — параметр горения соседних клеток в момент t ; dt — шаг времени. Параметр f_{ij}^t рассчитывается как

$$f_{ij}^t = 2n_{ij+}^t + n_{ijx}^t,$$

где

$n_{ij+}^t = |\{c_{i-1,j}, c_{i,j-1}, c_{i,j+1}, c_{i+1,j}\} \cap B_t|$ — количество ортогональных к c_{ij} клеток, в которых имеет место горение в момент t ,

$n_{ijx}^t = |\{c_{i-1,j-1}, c_{i-1,j+1}, c_{i+1,j-1}, c_{i+1,j+1}\} \cap B_t|$ — количество ортогональных к c_{ij} клеток.

Характеристика f_{ij}^t может принимать значение от 1 до 12 по количеству ортогональных и диагональных соседей у каждой некрайней клетки. Коэффициент для горящих ортогональных клеток положим равным 2, так как расстояние между центрами диагональных соседей больше, чем между центрами ортогональных. Для крайних клеток характеристика f_{ij}^t может принимать значение от 0 до 8, для угловых — от 0 до 5.

Клетка переходит из состояния B_t в состояние F_{t+1} , если в клетке заканчивается горючая масса. Пусть для каждой клетки c_{ij} задана горючая нагрузка m_{ij} в кг, ψ_{ij} — скорость выгорания нагрузки, выраженная в кг/с. С момента возгорания масса горючего вещества m_{ij} меняется по закону

$$(1) \quad m_{ij}^{t+1} = m_{ij}^t - \psi_{ij} dt,$$

где m_{ij}^t — масса горючей нагрузки клетки c_{ij} в момент времени t , dt — прошедшее время. Таким образом, с момента возгорания до прекращения горения в клетке c_{ij} проходит время m_{ij}/ψ_{ij} . Далее клетка переходит из множества B_t в множество F_{t+1} . Таким образом, для каждой клетки c_{ij} в модели возможны три варианта ее эволюции: постоянная принадлежность состоянию NC , постоянная принадлежность состоянию I_t либо последовательное прохождение через состояния I_t , B_t и F_t .

На рис. 1 показано распространение огня в трехкомнатном помещении. Черным выделены клетки из NC (негорючие стены), темно-серым — из F_{t0} ,

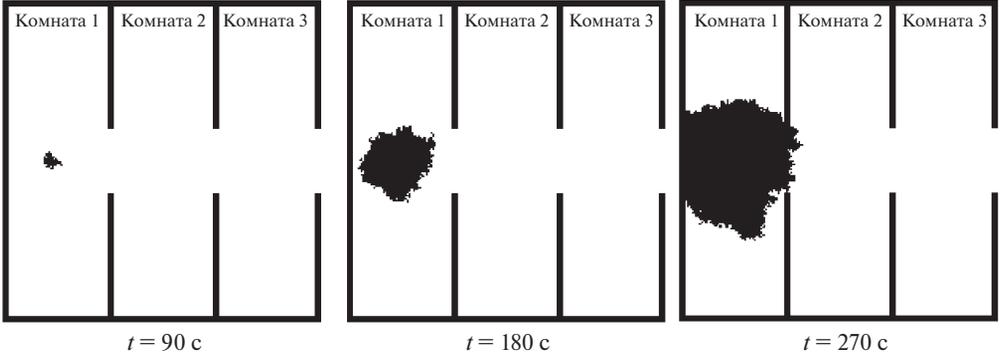


Рис. 1. Динамика распространения огня в помещении из трех комнат.

светло-серым — из B_{t_0} , белым — из I_{t_0} . Источник возгорания находился в центре комнаты 1.

Если B_t пусто, то распространение пожара прекращается. Действительно, если $B_t = \emptyset$, то $(\forall i \in [0, n])(\forall j \in [0, m])(n_{ij+}^t = 0 \& n_{ijx}^t = 0)$, следовательно, $(\forall i \in [0, n])(\forall j \in [0, m])(P_{ij}^{t+1} = 0)$, поэтому $B_{t+1} = \emptyset$. По индукции $(\forall i > 0)B_{t+n} = \emptyset$. В силу того, что пожар не возобновляется, при всех n имеем $I_{t+n} = I_t$, а также для выгоревших клеток $F_{t+n} = F_t$. В итоге разбиение S перестает изменяться и распространение огня завершается [19, 20].

2.2. Модель распространения тепла

Опишем модель распространения тепла, которая будет использоваться в предлагаемом комплексе. Пусть θ_{ij} — повышение температуры полностью теплоизолированной клетки при сгорании в ней 1 кг горючего вещества. Тогда

$$\theta_{ij} = \lambda_{ij}/C_{ij},$$

где λ_{ij} — удельная теплота сгорания нагрузки внутри клетки c_{ij} ; C_{ij} — теплоемкость клетки c_{ij} (сумма теплоемкости воздуха и перекрытий).

Воздух над горящей клеткой нагревается по закону

$$T_{ij}^{t+1} = T_{ij}^t + \psi_{ij}\theta_{ij}dt,$$

где T_{ij}^t — температура внутри клетки c_{ij} в момент времени t , dt — шаг модельного времени, ψ_{ij} — скорость выгорания горючей нагрузки [21]. Температура в клетке зависит от горения внутри и распространения тепла вне клетки. Пусть k_{ij} — характеристика теплопроводности клетки c_{ij} . Когда клетка обменивается теплом со связанными клетками, температура внутри клетки определяется соотношением

$$(2) \quad T_{ij}^{t+1} = T_{ij}^t + \frac{k_{ij}}{C_{ij}} \sum_{s \in S_{ij}} k_s (T_s^t - T_{ij}^t),$$

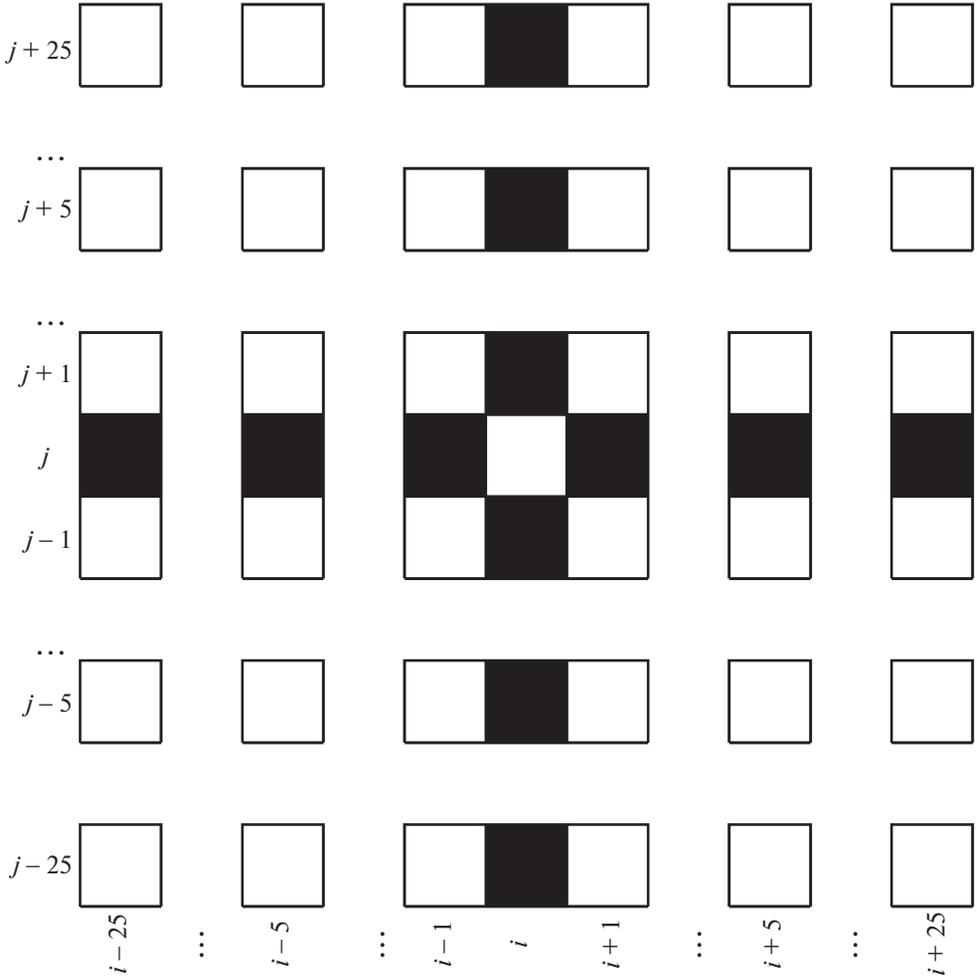


Рис. 2. Множество клеток, связанных с клеткой c_{ij} .

где T_s^t — температура внутри клетки s из S_{ij} в момент t , k_s — коэффициент, задающий теплопроводящие характеристики этой клетки.

Для определения множества клеток, связанных с рассматриваемой, в предлагаемой модели используется граф $G = (V, E)$.

Пусть $W \in C$ — множество клеток, соответствующих стене, и для каждой клетки c_{ij} есть вершина $G = (V, E)$, где $v_{ij} \in V$, $e_{ijkl} \in E$ — ребро с вершинами v_{ij} и v_{kl} . Тогда множество ребер E задается как

$$E = \left\{ e_{ijkl} \left[\left((i = k) \& (|j - l| \in \{5; 25\}) \right) \vee \left((j = l) \& (|i - k| \in \{5; 25\}) \right) \right] \& \right. \\
& \left. \& [\forall a, b (a \in [\min(i, k); \max(i, k)] \& b \in [\min(j, l); \max(j, l)]) \rightarrow c_{ab} \notin W] \vee \right. \\
& \left. \vee [((i = k) (|j - l| = 1)) \vee ((j = l) (|i - k| = 1))] \right\}.$$

Если в графе G присутствует ребро e_{ijkl} , то клетки c_{ij} и c_{kl} будем считать связанными. Каждая клетка имеет от 4 до 12 связанных клеток. На рис. 2 показан случай, когда это количество максимально, они выделены цветом.

Пользователь может задавать скорость распространения огня и тепла, модифицируя алгоритм выбора множества ребер G , значения ψ_{ij} , θ_{ij} , v , C_{ij} , k_{ij} , T_{ij}^0 . Возможно также добавление в модель третьего измерения, в этом случае граф G будет иметь ребра, содержащие клетки из различных слоев.

Температуру в крайних и угловых клетках предположим равной температуре окружающей среды. За счет таких клеток происходит теплообмен с окружающей средой.

Введение ребер, соединяющих далеко отстоящие клетки, позволяет ускорить процесс вычислений, увеличить шаг модельного времени и учесть различные способы распространения тепла.

2.3. Модель распространения дыма

Используемая модель аналогична модели распространения тепла. Масса горючей нагрузки внутри каждой горящей клетки изменяется по закону (1). При горении образуется дым, количество которого зависит от дымообразующей способности вещества. Оптическая плотность дыма μ_{ij} в клетке c_{ij} из множества B_t изменяется по закону

$$\mu_{ij}^{t+1} = \mu_{ij}^t + D_m \psi_{ij} dt / (h^2 z),$$

где D_m — дымообразующая способность вещества.

Зададим граф $G' = (V, E')$ на том же множестве вершин V . Множество ребер задается как

$$E' = \left\{ e_{ijkl} [((i = k) \& (|j - l| \in \{15; 50\})) \vee ((j = l) \& (|i - k| \in \{15; 50\}))] \& \right. \\ \& [\forall a, b (a \in [\min(i, k); \max(i, k)] \& b \in [\min(j, l); \max(j, l)]) \rightarrow c_{ab} \notin W] \vee \\ \left. \vee [((i = k) \& (|j - l| = 1)) \vee ((j = l) \& (|i - k| = 1))] \right\}.$$

Так как дым распространяется быстрее тепла, для G' выбраны более длинные ребра, связывающие более далекие клетки. Аналогично определяется множество S'_{ij} клеток, связанных с клеткой c_{ij} . Распространение дыма задается аналогичным (2) соотношением

$$\mu_{ij}^{t+1} = \mu_{ij}^t + k'_{ij} \sum_{s \in S'_{ij}} k'_s (\mu_s^t - \mu_{ij}^t),$$

где k' — коэффициент, регулирующий скорость распространения дыма: k'_{ij} — для клетки c_{ij} , k'_s — для одной из клеток из множества S'_{ij} ; μ_s^t — оптическая

плотность дыма для клетки из множества S'_{ij} [19, 20]. Дальность видимости l_{ij}^t в клетке c_{ij} в момент t можно вычислить по приведенному в [22] соотношению

$$l_{ij}^t = \frac{2,38}{\mu_{ij}^t}.$$

2.4. Математическая модель и алгоритм моделирования эвакуации

Будем рассматривать следующие объекты.

1. Множество стен, заданных координатами левого нижнего угла (x_W, y_W) , а также длиной и шириной x_{WW} и y_{WW} .

2. Множество выходов, представленных координатами левого нижнего угла (x_E, y_E) , шириной и длиной проема x_{WE} и y_{WE} . Полагаем, что человек, попавший в любую зону выхода, эвакуирован. При этом зона выхода должна быть отдалена от дверного проема достаточно для того, чтобы вышедшие не мешали эвакуации остальных [23].

3. Множество людей, подлежащих эвакуации. Каждого из них представляем как проекцию на плоскость xOy в виде круга. В качестве координат данных людей примем центры этих кругов.

4. Множество зон начального положения людей, заданных координатами левого нижнего угла (x_Z, y_Z) , длиной и шириной x_{WZ} и y_{WZ} . Так, учитывается то, что в некоторых помещениях в начальный момент эвакуации может не быть людей. Рассматриваемые параметры людей: координаты $\mathbf{x}(t)$ центра проекции на xOy ; радиус проекции r ; масса человека m ; его скорость $\mathbf{v}(t)$ и ускорение $\mathbf{a}(t)$; максимально возможная скорость v_{\max} и ускорение a_{\max} движения (в момент начала эвакуации равны нулю). Закон движения людей принимаем следующий:

$$(3) \quad \begin{aligned} x(t + \Delta t) &= x(t) + v(t)\Delta t, \\ v(t + \Delta t) &= v(t) + a(t)\Delta t, \end{aligned}$$

где Δt — шаг модельного времени.

Принимаем предположение, что скорости людей изменяются при столкновениях как при частично упругих ударах. Для описания частично упругого столкновения вводится коэффициент восстановления $0 \leq \epsilon \leq 1$. Нормальные составляющие u_{1n} и u_{2n} скорости движения к общей плоскости касательной к поверхностям тел в точке контакта после такого удара рассчитываются по формулам

$$(4) \quad \begin{aligned} u_{1n} &= -\epsilon v_{1n} + (1 + \epsilon) \frac{m_1 v_{1n} + m_2 v_{2n}}{m_1 + m_2}; \\ u_{2n} &= -\epsilon v_{2n} + (1 + \epsilon) \frac{m_1 v_{1n} + m_2 v_{2n}}{m_1 + m_2}. \end{aligned}$$

Здесь v_{1n} и v_{2n} — нормальные проекции скоростей движения агентов к плоскости соударения до удара, m_1 и m_2 — массы агентов. Тангенциальные проекции скоростей не меняются [24]. После столкновения со стеной у скорости меняется только проекция, перпендикулярная стене (меняется знак, значение модуля уменьшается в зависимости от ϵ).

Определим направление ускорения $\mathbf{a}(t)$ для каждого агента в предположении, что он стремится как можно быстрее попасть к ближайшему выходу, не сталкиваясь со стенами и другими агентами. Обозначим оптимальную с этой точки зрения скорость $\mathbf{v}_{\text{opt}}(t)$. Будем полагать, что модуль ускорения $\mathbf{a}(t)$ агента зависит от его физических возможностей: $|\mathbf{a}(t)| = a_{\text{max}}$, а направление совпадает с $\mathbf{v}_{\text{opt}}(t) - \mathbf{v}(t)$. Полагаем, что если скорость агента не оптимальна, то модуль ускорения максимален в силу его желания как можно быстрее покинуть помещение.

Если по направлению движения агента нет стен или других агентов, то $|\mathbf{v}_{\text{opt}}(t)| = v_{\text{max}}$. При попытке не столкнуться с другими агентом может уменьшаться модуль $\mathbf{v}(t)$. Будем выбирать вектор $\mathbf{v}_{\text{opt}}(t)$ следующим образом. Если \mathbf{e} — вектор направления к ближайшему выходу, l_α — расстояние от агента до ближайшего препятствия при движении под углом α к \mathbf{e} , L — заданное критическое расстояние, а r — радиус проекции агента, то модуль соответствующего вектора оптимальной скорости $v_{\alpha\text{opt}}(\alpha)$ можно вычислить как

$$(5) \quad v_{\alpha\text{opt}}(\alpha) = \begin{cases} v_{\text{max}}, & l_\alpha \geq L + r, \\ \frac{v_{\text{max}}(l_\alpha - r)}{L}, & r \leq l_\alpha \leq L + r, \\ 0, & l_\alpha \leq r. \end{cases}$$

В общем случае для достижения необходимой точности моделирования значения v_{max} и a_{max} нужно задавать для каждого агента индивидуально.

Введем в рассмотрение функцию

$$(6) \quad f(\alpha) = v_{\alpha\text{opt}}(\alpha) \cos(\alpha), \quad \alpha \in [-\pi/2; \pi/2].$$

Тогда угол γ векторов \mathbf{v}_{opt} и \mathbf{e} — это угол, при котором $f(\alpha)$ достигает максимума. Модуль \mathbf{v}_{opt} можно определить, подставив $\alpha = \gamma$

$$(7) \quad |\mathbf{v}_{\text{opt}}| = v_{\alpha\text{opt}}(\gamma).$$

Данный способ определения \mathbf{v}_{opt} учитывает способность агента к маневру на пути к ближайшему выходу, который, как мы предполагаем, ему известен.

Вектор \mathbf{v}_{opt} пересчитывается для всех агентов на каждом шаге. Агенты могут проявлять дополнительные свойства: неоднородность (за счет различной массы и радиуса проекции), а также индивидуальную направленность на выход из помещения [25].

В предлагаемой модели учитываются угол и дальность обзора агента, момент инерции и угол поворота его головы. Направление приближения агента

к выходу определяется вектором \mathbf{e} . Угол обзора полагаем равным 180° , так как $\alpha \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ (анализируются все альтернативы дальнейшего движения).

Полагаем, что дальность обзора агента не меньше L .

Также полагаем, что часть энергии при ударе переходит во вращение и в модели эта потеря учитывается с использованием коэффициента восстановления.

Использование разработанного алгоритма моделирования эвакуации состоит из следующих основных шагов.

1. Исходные данные: размеры, координат стен, выходов из помещения, параметры агентов.
2. Задание сети C : граф G , множества значений d и \mathbf{e} .
3. Генерация агентов в зонах эвакуации.
4. Вычисление для всех агентов \mathbf{v}_{opt} по формулам (5)–(7).
5. Расчет \mathbf{a} для всех агентов.
6. Вычисление \mathbf{v} для всех агентов по формуле (3).
7. Вычисление \mathbf{x} для всех агентов по формуле (3).
8. Пересчет скоростей агентов в случае их столкновений друг с другом и со стенами.
9. Проверка достижения выхода для всех агентов и исключение попавших в зону выхода.
10. Сбор статистики.
11. Отображение положения агентов и стен на экране в окне программы.
12. Переход к следующему шагу модельного времени.
13. Если необходимое количество промежуточных экспериментов не выполнено, то переход к шагу 3.
14. Отображение результатов эксперимента в виде графиков, таблиц.
15. Переход к шагу 1 (по запросу пользователя) [26].

Важным условием эвакуации является максимально возможное снижение вреда здоровью людей. Решение в данной работе позволяет получить оценку этого вреда за счет выделения мест с высокой температурой и задымленностью.

Задымленность помещений при пожаре влечет за собой понижение дальности видимости l_v , так как интенсивность света I при прохождении через задымление уменьшается в зависимости от начального значения, пройденного пути dl и оптической плотности дыма: $I = I_0 e^{-\int \mu(l) dl}$. Если область задымления небольшая (несколько метров), то можно полагать оптическую плотность дыма постоянной и тогда $I = I_0 e^{-\mu l}$. При известной задымленности дальность видимости определяется в виде расстояния, после прохождения которого интенсивность ослабевает на порядок. Это достигается при $l = \frac{\ln 10}{\mu}$ [27, 28].

Для учета влияния задымленности на скорость агентов используем в формуле (5) вместо l_α величину $l'_\alpha = \min(l_\alpha, \max(l_v, 3r))$ — расстояние до ближайшего препятствия l_α в направлении движения агента под углом α , ограниченное $\max(l_v, 3r)$ — величиной l_v при $l_v > 3r$ или $3r$ при $l_v < 3r$. Таким образом,

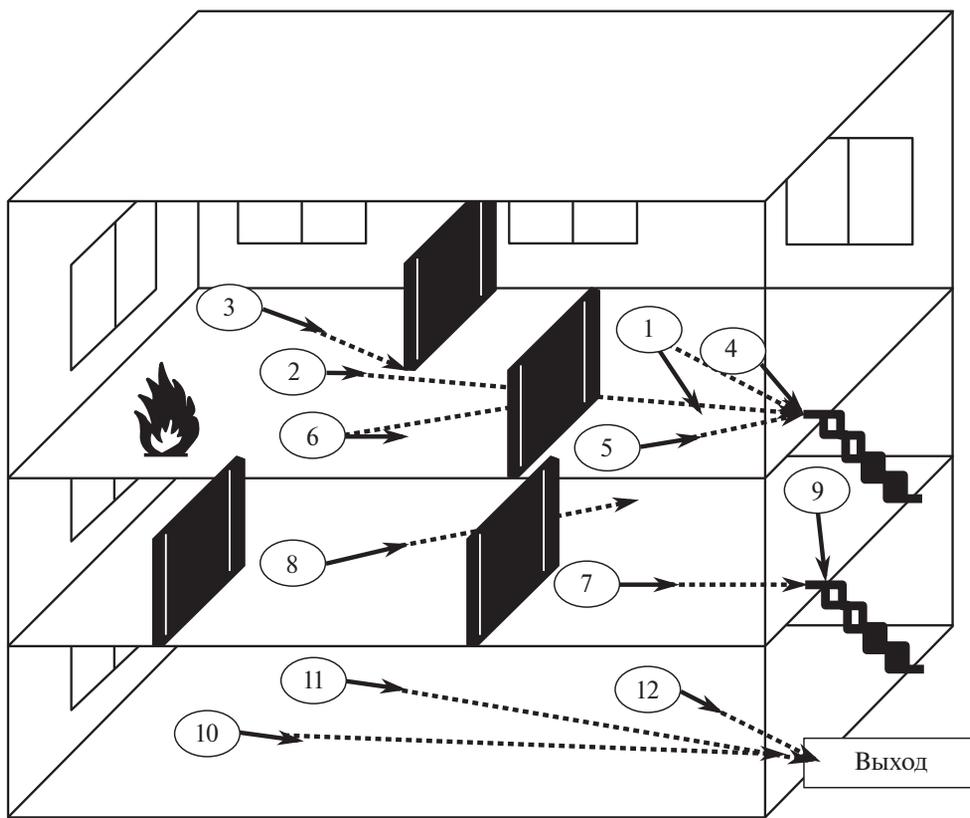


Рис. 3. Эвакуация при возгорании на третьем этаже здания.

при $l_v > L$ задымленность не меняет значительно ориентацию и скорость эвакуируемых. Если $3r < l_v \leq L$, то агенты затрудняются при ориентировании и снижают скорость, формула (5). При $l_v \leq 3r$ агенты практически не видят окружающих объектов и вынуждены двигаться на ощупь [29].

Предлагаемая концепция передвижения агентов при эвакуации схематично представлена на рис. 3, где возгорание началось на третьем этаже. На этом рисунке пунктирными стрелками обозначены направления, в которых желают двигаться агенты 1–12 (кратчайший путь к выходу), сплошными стрелками — векторы скорости, скорректированные агентами на данный момент с учетом препятствий и столкновений с другими агентами. Например, агент 1 меняет направление вектора скорости, пытаясь обойти агента 4.

2.5. Программно-информационный комплекс

По разработке программно-информационного комплекса решались следующие задачи.

1. Программно реализовать разработанные модели с возможностью совместного и отдельного моделирования распространения опасных факторов пожара и эвакуации.

2. Обеспечивать взаимодействие с пользователем через графический и консольный интерфейсы.
3. Отображать визуально положения агентов и препятствий, фронт огня, распределение тепла и дыма в помещении.
4. Позволять работать с широким классом помещений, карту которых пользователь может задавать.
5. Позволять пользователю проводить вычислительные эксперименты с различными начальными условиями и визуализировать их результаты.
6. Обеспечить возможность проведения кратных численных экспериментов с различными начальными условиями расположения агентов и источников огня в помещении. Цель таких экспериментов — анализ обстановки при пожарах в помещениях и построение усредненных зависимостей, между процессами распространения ОФП и эвакуации для выработки рекомендаций по обеспечению эвакуации.
7. Поддерживать многопоточную организацию решения задач, что позволит реализовывать кратные эксперименты, обладающие значительной вычислительной сложностью. Поддержка многопоточности необходима для эффективного управления комплексом через графический и консольный интерфейсы.

3. Пример использования программно-информационного комплекса

С использованием разработанного программно-информационного комплекса было проведено моделирование эвакуации из 10-этажного здания одновременно на всех этажах в режиме реального времени. Размер каждого этажа 38×32 м. План нулевого этажа, основанный на реальном расположении объектов в торговом центре, представлен на рис. 4.

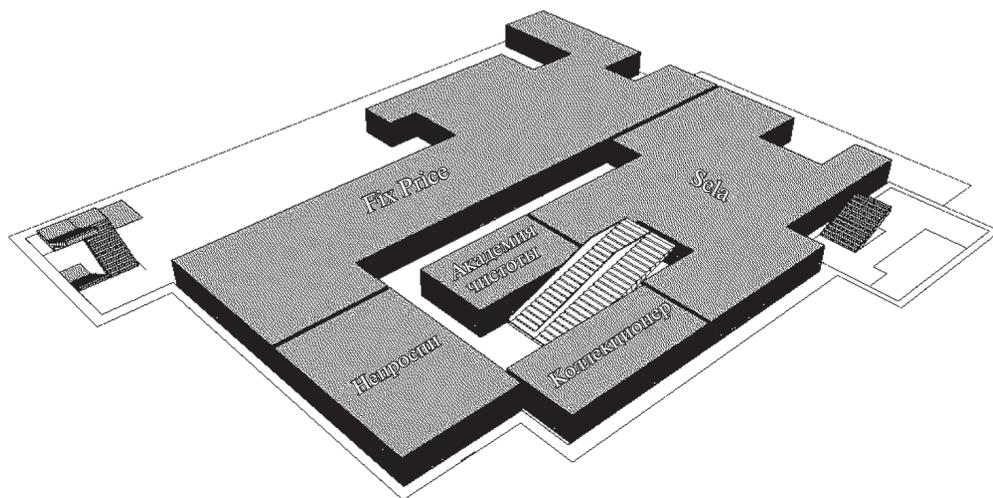


Рис. 4. План нулевого этажа торгового центра.

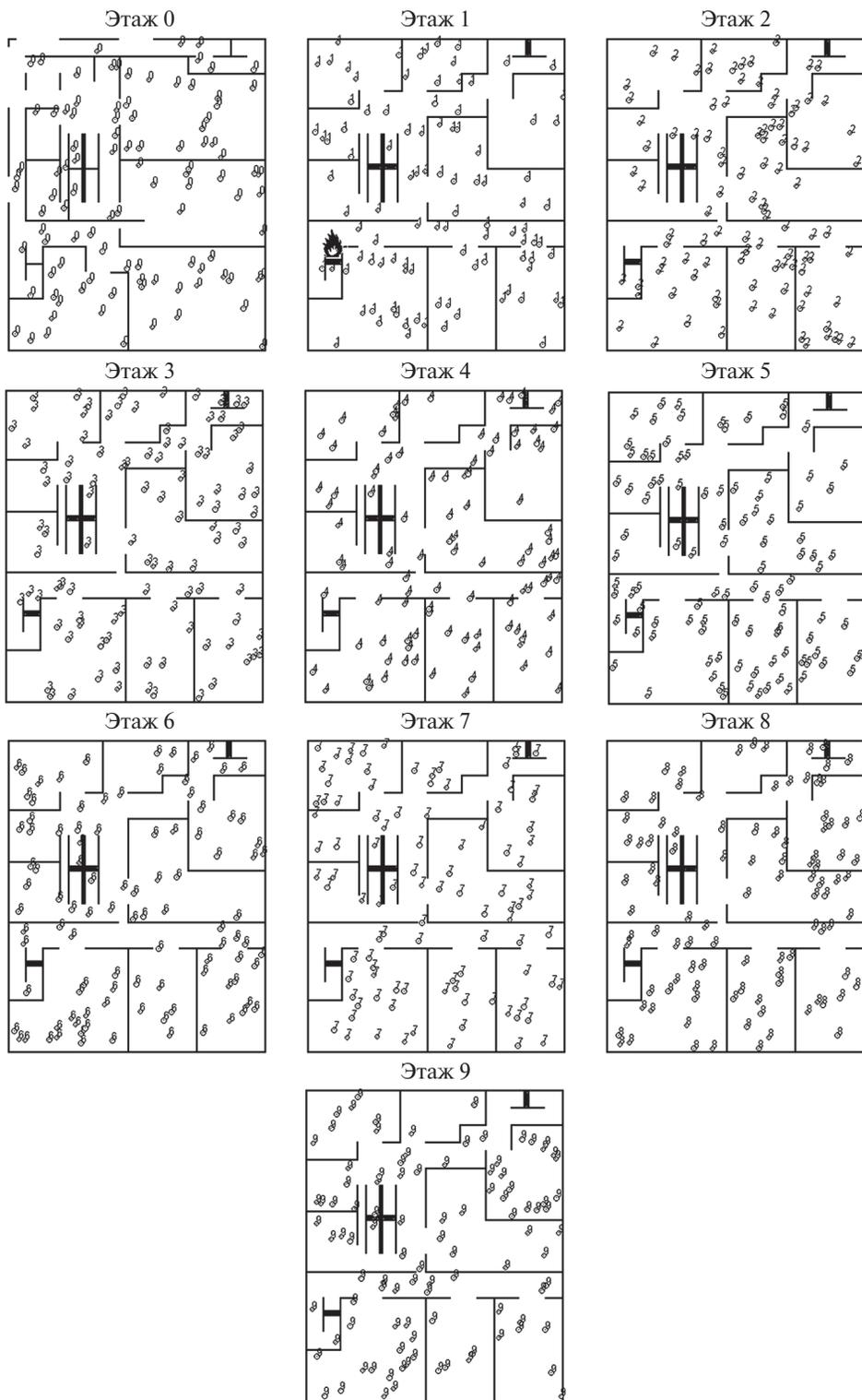


Рис. 5. Эвакуация на этажах 0–9 торгового центра.

Количество людей на этаже

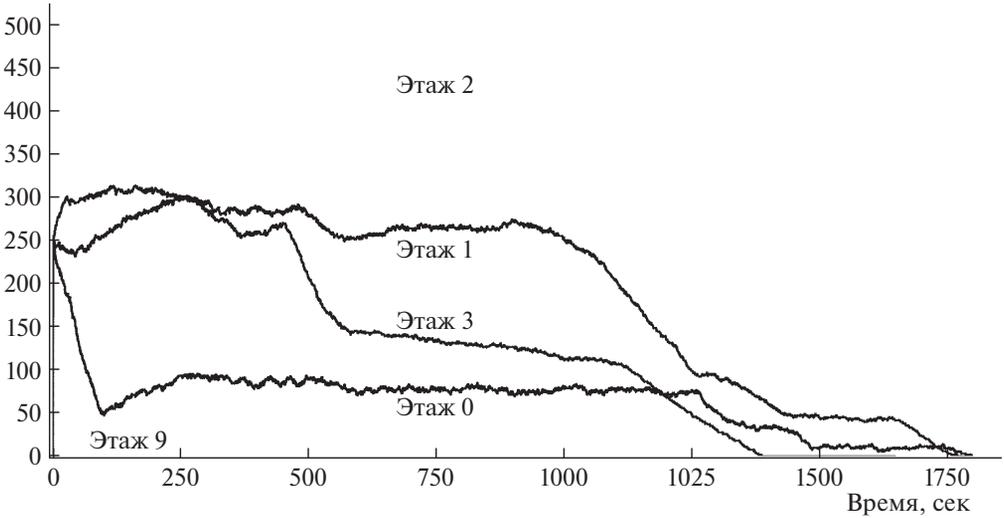


Рис. 6. Количество людей на этажах в процессе эвакуации из здания при условии $a_0(0) = a_1(0) = \dots = a_9(0) = 250$.

Количество людей на этаже

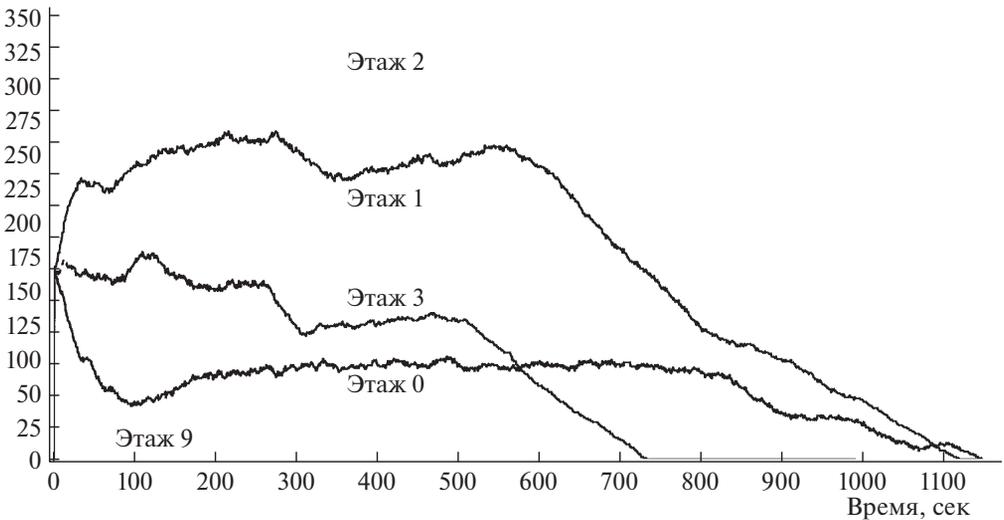


Рис. 7. Количество людей на этажах в процессе эвакуации из здания при условии $a_0(0) = a_1(0) = \dots = a_9(0) = 150$.

Промоделируем возникновение возгорания на 1 этаже и последующую эвакуацию людей со всех этажей здания. На рис. 5 представлен пример работы модуля визуализации расположения людей на 0–9 этажах здания в процессе эвакуации.

Обозначим через $a_0(t), a_1(t), \dots, a_9(t)$ количество людей на этажах 0, 1, \dots , 9 соответственно в моменты времени $t = 0, \dots, T$, где $t = 0$ и $t = T$ —

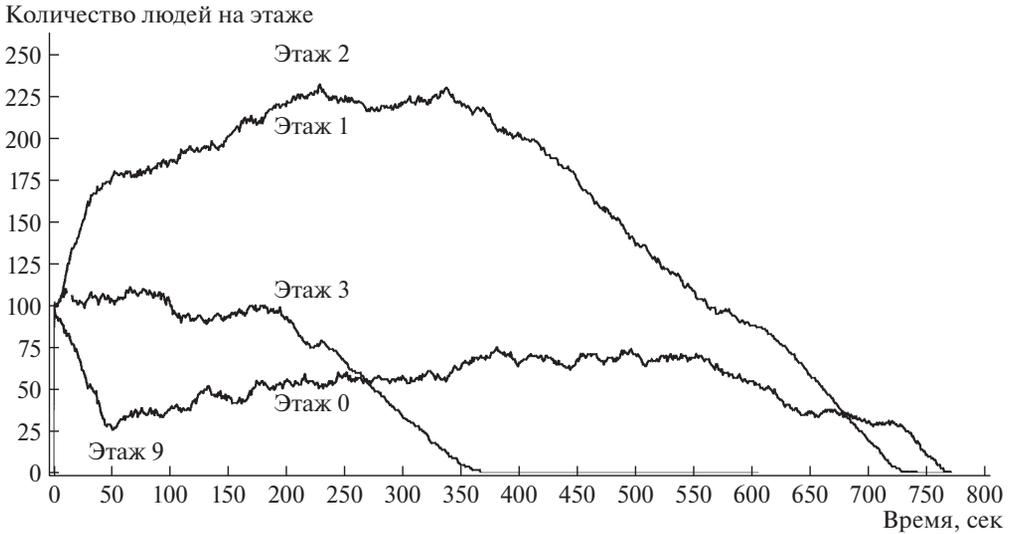


Рис. 8. Количество людей на этажах в процессе эвакуации из здания при условии $a_0(0) = a_1(0) = \dots = a_9(0) = 100$.

время начала и завершения эвакуации из здания. На рис. 6 представлены графики значений $a_0(t)$, $a_1(t)$, $a_2(t)$, $a_3(t)$ и $a_9(t)$, полученные в ходе вычислительного эксперимента при условии $a_0(0) = a_1(0) = \dots = a_9(0) = 250$. Графики $a_4(t)$, $a_5(t)$, $a_6(t)$, $a_7(t)$, $a_8(t)$ при всех проведенных вычислительных экспериментах оказывались расположены между графиками для $a_3(t)$ и $a_9(t)$ и на рис. 6, 7 и 8 не приведены.

Как видно из представленного графика, наибольшее скопление людей будет на первом и втором этажах. Там же наблюдается наибольшее время эвакуации из-за прибытия людей с верхних этажей. Данная ситуация оказывается потенциально опасной по причине возможной давки, а также превышения предельного времени пребывания людей в помещении с учетом его площади, расположения и свойств горючих материалов. Ниже будет показано, как модельные эксперименты с разработанным комплексом позволят определять максимальное наполнение этажей людьми при посещении торгового центра таким образом, чтобы при эвакуации их количество на «критических» первом и втором этажах не превышало допустимого.

Давка при эвакуации может возникнуть в случае, если для передвижения эвакуирующихся недостаточно свободного пространства. На основании анализа санитарно-эпидемиологических правил и норм будем полагать в модельном примере, что требования безопасности предписывают наличие не менее 4 м^2 площади на человека. С учетом того, что размеры этажей составляют $38 \times 32\text{ м}$, максимально допустимое количество людей на каждом этаже равно 304. Из рис. 6 видно, что при начальном количестве людей на каждом этаже, равном 250, число людей на втором этаже в процессе эвакуации превышает 500 в рассматриваемом вычислительном эксперименте. При

снижении начального количества посетителей до 150 перегрузка этажа 2 также наблюдается, рис. 7. Как показала серия вычислительных экспериментов, максимальное значение количества людей на втором этаже становится существенно меньше трехсот в случае, когда их начальное количество на этажах не превышает 100, рис. 8.

Таким образом, для предупреждения давки при эвакуации в условиях задачи можно рекомендовать ограничить посещение торгового центра: не более 100 человек на этаже одновременно.

Приведенный пример показывает, что разработанный программно-информационный комплекс может быть использован для получения количественных и качественных рекомендаций по мероприятиям и воздействиям для уменьшения времени эвакуации из помещений сложной формы. Эти рекомендации могут касаться как организации пребывания людей в уже используемых помещениях, так и устройства самих помещений на стадии их планирования или модернизации.

4. Заключение

Разработан многопоточный программно-информационный комплекс, позволяющий имитировать и анализировать динамику распространения опасных факторов пожара и эвакуацию людей в условиях распространения этих факторов.

Построенный комплекс базируется на разработанной интегрированной математической модели динамики распространения опасных факторов пожара и эвакуации. Модель разрабатывалась с использованием принципов клеточного автомата и мультиагентных систем с учетом физических столкновений людей при эвакуации. Программа позволяет в ходе моделирования изменять множество параметров исследуемой сложной системы как со стороны агентов, так и со стороны процессов пожара. Поэтому результаты работы обладают высокой функциональностью в исследованиях по противопожарной подготовке помещений, а также при анализе распространения опасных факторов пожара и процессов эвакуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Свирин И.С.* Обзор моделей распространения пожара в зданиях // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2013. № 6. С. 114–129.
2. *Apiecionek L., Zarzycki H., Czerniak J. et al.* The Cellular Automata Theory with Fuzzy Numbers in Simulation of Real Fires in Buildings // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. V. 559. P. 169–182.
3. 3533-41-РП-1 СИТИС: ВИМ 4.11 Руководство пользователя, редакция 1 от 10.03.17 / Строительные информационные технологии и системы ООО «Ситис». Екатеринбург, 2017. 122 с.
4. *Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Соловьев Р.А. и др.* Математическая модель развития пожара в системе помещений // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 121–128.

5. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
6. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Литвинцев К.Ю. и др. Моделирование динамики пожаров в спортивных сооружениях // Пожарная безопасность. 2007. № 4. С. 49–58.
7. Драйэдел Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990. 424 с.
8. Антуков А.М., Брацун Д.А., Люшин А.В. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5. № 3. С. 491–508.
9. Moussaida M., Helbing D., Theraulaza G. How Simple Rules Determine Pedestrian Behavior and Crowd Disasters // PNAS. 2011. V. 108. № 17. P. 6884–6892.
10. Самошин Д.А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации: Монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. 210 с.
11. Kirik E., Yurgel'yan T., Krouglov D. Artificial Intelligence of Virtual People in CAFF Pedestrian Dynamics Model // LNCS. V. 6068/2010. 2010. P. 513–520.
12. Самошин Д.А. Расчет времени эвакуации людей. Проблемы и перспективы // Пожаровзрывобезопасность. 2004. № 1. С. 33–46.
13. Alizadeh R. A dynamic cellular automaton model for evacuation process with obstacles // Safet. Sci. 2011. V. 49(2). P. 315–323.
14. Bosse T., Hoogendoorn M., Klein M. et al. Modelling Collective Decision Making in Groups and Crowds: Integrating Social Contagion and Interacting Emotions, Beliefs and Intentions // Auton Agnts Mult-Agnt Syst. 2013. V. 27. P. 52–84.
15. Van der Wal C.N., Formolo D., Robinson M.A. Simulating crowd evacuation with socio-cultural, cognitive, and emotional elements // In Transactions on Computational Collective Intelligence XXVII. Springer, Cham. 2017. P. 139–177.
16. Zheng X., Zhong T., Liu M. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches // Building and Environment. 2009. V. 44(3). P. 437–445.
17. Korhonen T., Hostikka S. Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS + Evac. Technical Reference and User's Guide (FDS 6.5.2, Evac 2.5.2, DRAFT) М.: VTT Technical Research Centre of Finland. 2016. 115 p.
18. 3533-41-ПП-1 СИТИС: ВИМ 4.11 Руководство пользователя, редакция 1 от 10.03.17 / Строительные информационные технологии и системы ООО «Ситис». Екатеринбург, 2017. 122 с.
19. Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Самарцев А.А. и др. Математическая модель динамики развития пожара в помещениях // Управление большими системами. Выпуск 74. 2018. С. 42–62.
20. Samartsev A.A., Rezchikov A.F., Kushnikov V.A. et al. Fire and Heat Spreading Model Based on Cellular Automata Theory // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015. 2018. 032120 p.
21. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика М.: Физматлит, 2005. 544 с.
22. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к приказу МЧС России от 30.06.2009 № 382.
23. Бекларян А.Л. Фронт выхода в модели поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // Вест. Тамбов. ун-та. Серия: Естественные и технические науки. 2015. Т. 20. № 4. С. 851–856.

24. *Путилов К.А.* Курс общей физики. Т. 1. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика. Изд. 11. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963. 560 с.
25. *Winter H.* Modelling Crowd Dynamics During Evacuation Situations Using Simulation M.: Lancaster University. 2012. 20 p.
26. *Самарцев А.А., Иващенко В.А., Резчиков А.Ф. и др.* Мультиагентная модель процесса эвакуации людей из помещений при возникновении чрезвычайных ситуаций // Управление большими системами. Выпуск 72. 2018. С. 217–244.
27. *Савельев И.В.* Курс общей физики: в 4-х т. Т. 3. Оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. М.: Наука, 1989. 528 с.
28. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: приказ МЧС РФ от 30 июня 2009 г. № 382 (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/12169057/> (дата обращения: 11.12.2021).
29. *Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Самарцев А.А. и др.* Интегрированная модель динамики распространения опасных факторов пожара в помещениях и эвакуации из них // Вест. компьют. и информ. технологий. 2019. № 2 (176). С. 47–56.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галеевым.

Поступила в редакцию 02.08.2021

После доработки 01.12.2021

Принята к публикации 26.01.2022