

# Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. D. Tsvirkun, A. F. Rezhnikov, A. Samartsev,  
V. A. Ivaschenko, V. A. Kushnikov, A. S. Bogomolov,  
L. Yu. Filimonyuk, Mathematical model of fire  
dynamics development in premises, *UBS*, 2018,  
Issue 74, 42–62

DOI: 10.25728/ubs.2018.74.3

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you  
have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 44.211.24.175

November 4, 2024, 14:30:00



УДК 004.94:614.841  
ББК 32.813

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИЯХ

Цвиркун А. Д.<sup>1а</sup>, Резчиков А. Ф.<sup>2аб</sup>  
Самарцев А. А.<sup>3б</sup>, Иващенко В. А.<sup>4б</sup>,  
Кушников В. А.<sup>5б</sup>, Богомолов А. С.<sup>6б</sup>,  
Филимонюк Л. Ю.<sup>7б</sup>

<sup>а</sup>ФГБУН Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва,

<sup>б</sup>Институт проблем точной механики и управления РАН,  
Саратов)

*Предлагается математическая модель динамики развития пожара в помещениях. Существенным отличием модели является снижение сложности вычислений и повышение точности результатов за счет использования принципов клеточных автоматов. Разработанный программный комплекс с поддержкой параллельных процессов позволяет изменять геометрию помещений и отображать динамику состояния среды при пожаре, что необходимо для планирования действий*

---

<sup>1</sup> Анатолий Данилович Цвиркун, главный научный сотрудник (tsvirkun@ipu.ru).

<sup>2</sup> Александр Федорович Резчиков, член-корреспондент РАН, научный руководитель ИПТМУ РАН, главный научный сотрудник ИПУ РАН (iptmuran@san.ru).

<sup>3</sup> Андрей Алексеевич Самарцев, аспирант (samaand@ya.ru).

<sup>4</sup> Владимир Андреевич Иващенко, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник (iptmuran@san.ru).

<sup>5</sup> Вадим Алексеевич Кушников, доктор технических наук, директор ИПТМУ РАН (iptmuran@san.ru).

<sup>6</sup> Алексей Сергеевич Богомолов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (alexbogomolov@ya.ru).

<sup>7</sup> Леонид Юрьевич Филимонюк, кандидат технических наук, научный сотрудник (iptmuran@san.ru).

*по ликвидации пожаров и эвакуации людей. Использование предложенной модели и программного комплекса совместно с известными моделями эвакуации позволит улучшить планировку помещений и уменьшить время эвакуации при пожарах.*

Ключевые слова: математическая модель, модель, динамика развития пожара, помещение, эвакуация.

## **1. Введение**

Проблема обеспечения безопасности людей при пожарах приобретает все большую актуальность. В последние годы число пожаров по России выросло до 240-300 тысяч в год. Пожары часто приводят к травмам и жертвам среди людей [14]. В связи с этим большое значение приобретает прогнозирование опасных факторов пожара и принятие упреждающих решений по устранению пожароопасных ситуаций [3, 4, 9-12].

Однако пожароопасные ситуации удается устранить далеко не всегда. Поэтому придается большое значение моделированию динамики развития пожара в помещениях, которое позволяет повысить уровень подготовки персонала противопожарных служб в области принятия эффективных решений по пожарной безопасности [1].

Для моделирования динамики развития пожара в помещениях в настоящее время широко применяются термогазодинамические модели, к которым относятся интегральные, зонные и полевые модели [6]. Интегральные и зонные модели, представляющие собой описание динамики развития пожара в виде систем дифференциальных уравнений, не столь критичны с точки зрения сложности вычислений, но в них имеет место существенное усреднение значений параметров по значительным пространствам, иногда по целым комнатам. Это неизбежно сказывается на получаемых с их помощью результатах.

Полевые модели носят более универсальный характер ввиду использования меньшего количества допущений при

построении, позволяют получить несколько лучшие по точности результаты, но требуют для своей реализации значительных вычислительных ресурсов.

В итоге термогазодинамические модели имеют множество допущений и большей частью оказываются весьма приближенными. Эти модели также несостоятельны и с точки зрения скорости вычислений. Поэтому использовать их для исследования динамики развития пожара в помещениях нецелесообразно.

В связи с этим приобретает актуальность задача создания новых моделей, которые будут, с одной стороны, достаточно простыми с точки зрения реализации и сложности вычислений, а с другой стороны, будут воспроизводить реалистичную картину процесса развития пожара. Эти модели должны быть также просты с точки зрения восприятия исследователем. Ведь зачастую при представлении данных моделей с помощью громоздких систем дифференциальных уравнений исследователь вынужден абстрагироваться от физического смысла из-за их сложности, что связано с риском совершения грубой ошибки при разработке модели как на этапе ее построения, так и на этапе реализации на ЭВМ.

К таким моделям следует отнести модель, представленную, например, в статьях [5, 16]. В этой и ряде других статей описаны модели развития пожара на основе клеточных автоматов. Однако авторами этих статей не учтены возможности:

- изменения геометрии помещений в режиме интерактивного взаимодействия пользователя с ЭВМ;
- отображения динамики изменения состояния среды в помещениях, в которых будет распространяться пожар.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность, научную новизну и практическую значимость данного исследования.

## 2. Постановка задачи

Необходимо построить гибкую к изменению параметров модель процессов распространения огня, тепла и задымленности при пожаре, которая позволит воспроизводить реальную динамику этих процессов.

## 3. Модель распространения огня

Пусть площадь помещения, заданная в декартовой системе координат  $xOy$ , разбита сетью  $S$  на квадратные элементы (клетки) со стороной  $dl$ , например, равной  $dl = 0,05$  м. Тогда  $S = \{c_{ij} \mid 0 \leq i < n, 0 \leq j < m\}$  – сеть, разделяющая помещение на клетки;  $n, m$  – количество клеток по горизонтали и вертикали соответственно;  $c_{ij}$  – клетка с координатами  $(i, j)$ .

Будем считать, что в определенный момент времени  $t$  каждая клетка находится в одном из следующих состояний.

1. Внутри клетки невозможно горение. Это означает, что клетке соответствует участок стены или пола из негорючего материала. Такие клетки не меняют своего состояния в ходе моделирования. Если внутри клетки  $c_{ij}$  невозможно горение, то будем это обозначать как  $c_{ij} \in NC$ .

2. Внутри клетки возможно горение. Это означает, что клетке соответствует участок стены или пола из горючего материала. В такой клетке в ходе моделирования может иметь место возгорание. Если внутри клетки  $c_{ij}$  не наблюдалось горение к моменту времени  $t$ , то будем это представлять в форме  $c_{ij} \in I_t$ .

3. Внутри клетки имеет место горение. Это означает, что клетке соответствует участок стены или пола из горючего материала, который в данный момент горит. Горящий материал должен через некоторое время потухнуть, т.е. перейти в состояние «Материал внутри клетки выгорел». Если клетка  $c_{ij}$  горит в момент времени  $t$ , то будем это обозначать выражением  $c_{ij} \in B_t$ .

4. Материал внутри клетки выгорел. Это означает, что клетке соответствует участок стены или пола из горючего

материала, который в какой-то момент времени в прошлом горел, но сейчас не горит и в будущем гореть не будет – все горючие вещества израсходованы. Такие клетки больше не меняют свои характеристики в ходе моделирования. Нахождение клетки  $c_{ij}$  в данном состоянии в момент времени  $t$  будем записывать в виде  $c_{ij} \in F_t$ .

При этом для любого момента времени  $t$  семейство множеств  $\{NC, I_t, B_t, F_t\}$  является разбиением множества  $S$ , т.е. любые два множества из семейства попарно не пересекаются, а объединение всех множеств семейства равно множеству  $S$ . Иначе говоря, в каждый момент времени  $t$  клетка находится в одном и только одном состоянии из семейства  $\{NC, I_t, B_t, F_t\}$ .

Отметим также, что имеют место соотношения:

$$I_0 \supseteq I_1 \supseteq \dots \supseteq I_t \supseteq I_{t+1} \supseteq \dots;$$

$$F_0 \subseteq F_1 \subseteq \dots \subseteq F_t \subseteq F_{t+1} \subseteq \dots .$$

Пусть имеется некоторое множество  $B_0$  клеток, внутри которых в момент модельного времени  $t = 0$  возникло горение. Все остальные клетки принадлежат либо множеству  $NC$ , либо множеству  $I_0$ , в зависимости от того, из горючего или негорючего материала сделан участок пола к нему относящийся. Отметим, что  $F_0 = \emptyset$ . Множества  $\{I_{t+1}, B_{t+1}, F_{t+1}\}$  определяются на каждом шаге модельного времени, исходя из множеств  $\{NC, I_t, B_t, F_t\}$ , по приведенному ниже алгоритму.

Распространение пожара в том или ином направлении в момент времени  $t + 1$  определяется вероятностью  $P_{ij}^t$  возгорания внутри клетки, находящейся в состоянии  $I_t$ , с учетом ее характеристик и наличия соседних клеток, в которых наблюдается горение.

Вероятность возгорания внутри клетки определяется по соотношению, приведенному в [8]:

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

где  $v_{ij}$  – линейная скорость распространения огня для клетки  $c_{ij}$ ; скорость, определяемая материалом участка пола, которому соответствует клетка;  $f_{ij}^t$  – параметр, характеризующий горение

соседних клеток в момент времени  $t$ ;  $dt$  – шаг модельного времени.

Параметр  $f_{ij}^t$  рассчитывается по выражению

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

где  $n_{ij+}^t$  – количество клеток, в которых имеет место горение в момент времени  $t$ , расположенных ортогонально,  $n_{ij+}^t = \left| \left\{ c_{i-1,j}, c_{i,j-1}, c_{i,j+1}, c_{i+1,j} \right\} B_t \right|$ , а  $n_{ijx}^t$  – диагонально,  $n_{ijx}^t = \left| \left\{ c_{i-1,j-1}, c_{i-1,j+1}, c_{i+1,j-1}, c_{i+1,j+1} \right\} B_t \right|$ , по отношению к клетке  $c_{ij}$ .

Параметр  $f_{ij}^t$  может принимать значение на отрезке  $[0, 12]$ , так как у каждой не крайней клетки имеется 4 ортогональных и 4 диагональных клетки-соседа. Если все эти клетки горят, то параметр  $f_{ij}^t$  принимает значение 12, если все они не горят, т.е. принадлежат множеству  $\overline{C}B_t$ , то параметр  $f_{ij}^t$  равен 0. Доля горящих клеток, расположенных ортогонально по отношению к рассматриваемой клетке, принимается в два раза большим, чем диагонально расположенных клеток, так как расстояние между центрами диагонально расположенных клеток-соседей больше, чем расстояние между центрами ортогонально расположенных клеток-соседей. Для крайних клеток параметр  $f_{ij}^t$  может принимать значение на отрезке  $[0, 8]$ , а для угловых – на отрезке  $[0, 5]$ .

Клетка переходит из состояния  $B_t$  «Внутри клетки наблюдается горение» в состояние  $F_{t+1}$  «Материал внутри клетки выгорел», если внутри клетки заканчивается вся горючая масса. Пусть для каждой клетки  $c_{ij}$  задана горючая нагрузка  $m_{ij}$  в кг,  $\psi_{ij}$  – скорость выгорания горючей нагрузки в кг/с.

С момента возгорания в клетке масса горючего вещества  $m_{ij}$  меняется внутри нее 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  $t$ .

Таким образом, с момента возгорания до прекращения горения в клетке  $c_{ij}$  проходит время, определяемое выражением  $m_{ij} / \psi_{ij}$ . Формально вероятность  $H_{ij}^t$  перехода клетки из

состояния  $B_t$  в состояние  $F_{t+1}$  определяется выражением  $H_{ij}^t = 1$ , если  $m_{ij}^t \leq 0$ , и  $H_{ij}^t = 0$  в противном случае.

Для каждой клетки  $c_{ij}$  выделены три варианта ее эволюции:

1. Неизменная принадлежность состоянию  $NC$ .
2. Принадлежность состоянию  $I_t$  на всем протяжении моделирования.
3. Последовательное прохождение через состояния  $I_t$ ,  $B_t$  и  $F_t$ .

На рис. 1 показана динамика распространения огня в помещении из трех комнат. Черным цветом выделены клетки из множества  $NC$ , которые представляют собой стены, сделанные из негорючего материала. Темно-серым цветом выделены клетки, принадлежащие множеству  $F_{t_0}$ , светло-серым – множеству  $B_{t_0}$ , а белым – множеству  $I_{t_0}$ . Источник огня изначально находился в центре самой левой комнаты – комнаты 1.

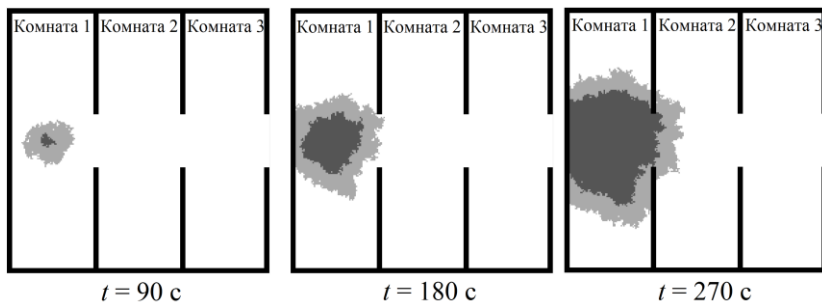


Рис. 1. Динамика распространения огня в помещении из трех комнат

Пожар перестает распространяться в тот момент времени  $t$ , когда множество  $B_t = \emptyset$ . 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  $(\forall i \in [0, n)) (\forall j \in [0, m)) (P_{ij}^{t+1} = 0)$ , а поэтому  $B_{t+1} = \emptyset$ . По индукции  $(\forall n > 0) B_{t+n} = \emptyset$ .

Таким образом, все клетки, материал внутри которых не выгорел на момент времени  $t$ , так и останутся негоревшими,



т.е.  $(\forall n > 0) I_{t+n} = I_t$ . Так как множество клеток, материал внутри которых выгорел, может пополниться только за счет клеток, находящихся в этом состоянии, то  $(\forall n > 0) F_{t+n} = F_t$ . В итоге разбиение множества  $S$  перестает эволюционировать во времени и процесс распространения огня завершается [15].

#### 4. Модель распространение тепла

Пусть  $\theta_{ij}$  – значение, на которое может повыситься температура воздуха и перекрытий внутри клетки при условии ее полной тепловой изоляции при сгорании 1 кг горючего вещества внутри клетки

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

где  $\lambda_{ij}$  – удельная теплота сгорания горючей нагрузки внутри клетки  $c_{ij}$ ;  $C_{ij}$  – теплоемкость клетки  $c_{ij}$ , представляющая собой сумму теплоемкостей воздуха и перекрытий, соответствующих данной клетке.

Если внутри клетки наблюдается горение, то воздух над ней нагревается по закону [7]

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

где  $T_{ij}^t$  – температура внутри клетки  $c_{ij}$  в момент времени  $t$ ;  $dt$  – шаг модельного времени.

Однако температура внутри клетки может изменять величину не только за счет сгорания в ее пределах вещества, но и за счет распространения тепла.

Пусть  $k_{ij}$  – коэффициент, задающий теплопроводящие характеристики клетки  $c_{ij}$ , который зависит от материала и от высоты потолков. Клетка  $c_{ij}$  может обмениваться теплом с множеством других, связанных с ней клеток. Пусть также  $S_{ij}$  – множество клеток, связанных с клеткой  $c_{ij}$ ,  $T_s^t$  – температура внутри одной из клеток множества  $S_{ij}$  на шаге модельного времени  $t$ , а  $k_s$  – коэффициент, задающий теплопроводящие характеристики внутри клетки  $s$  из множества  $S_{ij}$ .

Тогда температура внутри клетки  $c_{ij}$  на каждом следующем шаге модельного времени определяется соотношением

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

Вообще говоря, определить множество связанных клеток можно по-разному, корректируя, уточняя или приспособлявая модель к различным условиям ее использования. В используемой модели выбрана конфигурация, заданная графом  $G = (V, E)$ .

Пусть  $W \subset C$  – множество клеток, которым соответствует стена, и для каждой клетки  $c_{ij}$  существует вершина графа  $G = (V, E)$   $v_{ij} \in V$ , а  $e_{ijkl} \in E$  – ребро графа между вершинами  $v_{ij}$  и  $v_{kl}$ .

Тогда множество ребер  $E$  задается следующим образом:

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

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 с ней клеток. Пользователь модели может корректировать скорость распространения огня и тепла путем модификации алгоритма выбора множества ребер для графа  $G$ , изменением значений параметров  $\psi_{ij}$ ,  $\theta_{ij}$ ,  $v$ ,  $C_{ij}$  и  $k_{ij}$  или начальных условий  $T_{ij}^0$ . 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 можно считать равной температуре окружающей среды  $T_{\text{окр}}$  на каждом шаге модельного времени. 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.

Известно, что воздух обладает низкой теплопроводностью, поэтому основными механизмами передачи тепла при пожаре являются конвекция и излучение. Можно считать, что клетки, обменивающиеся теплом с помощью «длинных» ребер графа  $G$ , делают это с помощью конвекции и излучения.

### 5. Модель распространения дыма

Данная 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  $\mu_{ij}$  в клетке  $c_{ij}$ , которая принадлежит множеству  $B_t$  «Внутри клетки наблюдается горение» растет каждый шаг модельного времени по закону

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

где  $D_m$  – дымообразующая способность вещества.

Дым начинает распространяться по помещению и попадать в соседние клетки. Для описания этого процесса можно прибегнуть к тому же приему, что и при моделировании распространения тепла.

Зададим граф  $G'$ , который будет отличаться от графа  $G$  лишь множеством ребер. Множество его ребер задается следующим образом:

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

Так как дым распространяется быстрее тепла, то для графа  $G'$  выбраны более длинные ребра, которые обеспечивают связь между более дальними клетками. Аналогичным образом определяется множество  $S_{ij}'$  клеток, связанных с клеткой  $c_{ij}$ . С учетом этого распространение дыма каждый шаг модельного времени задается аналогичным (2) соотношением:

$$\mu_{ij}^{t+1} = \mu_{ij}^t + k_{ij}^t \sum_{s \in S_{ij}^t} k_s^t (\mu_s^t - \mu_{ij}^t),$$

где  $k'$  – коэффициент, регулирующий скорость распространения дыма:  $k_{ij}'$  – для клетки  $c_{ij}$ ,  $k_s'$  – для одной из клеток из множества  $S_{ij}'$ ;  $\mu_s^t$  – оптическая плотность дыма для клетки из множества  $S_{ij}'$ .

Дальность видимости  $l_{ij}^t$  в клетке  $c_{ij}$  в момент времени  $t$  можно вычислить по соотношению  $l_{ij}^t = 2,38/\mu_{ij}^t$  [2].

## **6. Программная реализация предложенной модели**

Для реализации модели на языке *Java* разработан оригинальный программно-информационный комплекс *FireSim* с применением библиотеки графического интерфейса *Swing*. Комплекс использует три потока выполнения, что позволяет эффективно, без задержек, управлять процессом моделирования и отображением модели в окне программы, используя графический интерфейс (*GUI*) и интерфейс командной строки (*CLI*). Блок-схема программы, организующей распределение задач между потоками и порядок их выполнения, приведена на рис. 2.

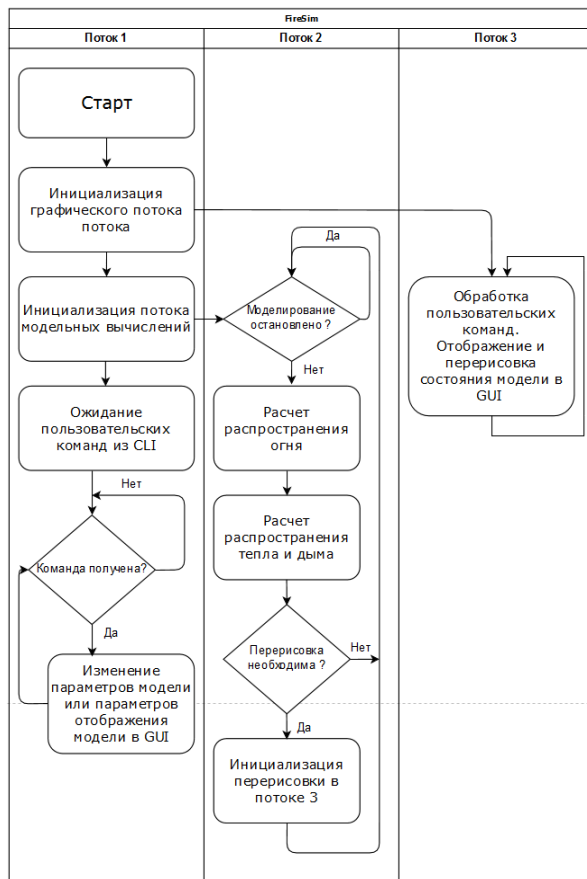


Рис. 2. Блок-схема работы программы

На рис. 2 обозначено: *GUI* – Graphical User Interface – графический пользовательский интерфейс; *CLI* – Command Line Interface – интерфейс командной строки. Используя *GUI* и *CLI*, пользователь может изменять режим работы программы в реальном времени, например, останавливать и возобновлять моделирование, добавлять источники огня, наблюдать состояния полей распространении огня, температур и задымленности, а также изменять вид их отображений.

## 7. Анализ результатов моделирования

С помощью разработанной модели исследована динамика развития пожара в помещении, план которого представлен на рис. 1. Размеры помещения –  $10 \times 10$  м. Стены заданы координатами левого нижнего угла  $(x, y)$ , а также шириной по осям  $Ox$  и  $Oy$  ( $xWidth$  и  $yWidth$ ) в формате  $(x; y; xWidth; yWidth)$  следующим образом:  $\{(0,0; 0,0; 10; 0,2); (0,0; 0,2; 0,2; 9,6); (0,0; 9,8; 10; 0,2); (9,8; 0,2; 0,2; 3,8); (9,8; 6,0; 0,2; 3,8); (3,3; 0,2; 0,2; 3,8); (3,3; 6,0; 0,2; 3,8); (6,6; 0,2; 0,2; 3,8); (6,6; 6,0; 0,2; 3,8)\}$ .

Стены при моделировании считались негорючим, а пол между стенами – горючим. Таким образом, все клетки, соответствующие пространству внутри стен принадлежат множеству  $NC$ . Множество  $B_0$  задано совокупностью 5 клеток: клеткой с координатами  $(1,25; 5)$  в середине комнаты 1, а также четырьмя ее ортогональными соседями. Все остальные клетки в момент времени  $t_0 = 0$  принадлежат множеству  $I_0$ . Шаг модельного времени  $dt = 0,04$ с.

При моделировании использовались следующие значения параметров модели:

$$(\forall i \in [0, n]) (\forall j \in [0, m]) (\theta_{ij} = 36000 \text{ К}, m_{ij} = 0,1 \text{ кг},$$

$$\psi_{ij} = 0,0015 \text{ кг/с}, T_{ij}^0 = 293 \text{ К}, v_{ij} = 0,005 \text{ м/с}, k_{ij} = 0,2,$$

$$D_m = 23 \text{ м}^2/\text{кг}, c_{ij} \notin NC \rightarrow C_{ij} = 1,0, c_{ij} \in NC \rightarrow C_{ij} = 4,0).$$

На рис. 3 приведено отображение распределения температуры в помещении в момент времени  $t = 270$  с в окне программы *FireSim*.

Температура отображается согласно шкале, изображенной на этом рисунке справа, в диапазоне от  $T_{min} = 20^\circ\text{C}$  (белый цвет, который используется также и для более низких температур) до  $T_{max} = 500^\circ\text{C}$  (черный цвет, который используется также и для более высоких температур). Черным цветом также показаны стены. При желании пользователь может изменять  $T_{min}$  и  $T_{max}$  с помощью команд консольного интерфейса. Из рисунка видно, что скорость распространения тепла сквозь стены значительно меньше, чем по открытому пространству. У выхода можно

заметить некоторое искажение поля температур в виде светлых полос, которые расположены на расстоянии 5 и 25 клеток от выхода и связаны со способом выбора графа  $G$ .

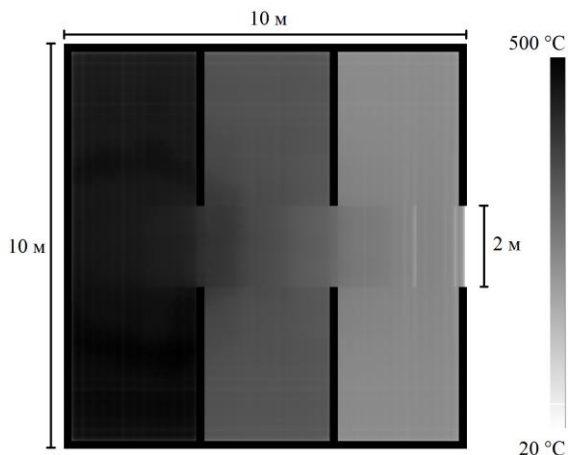
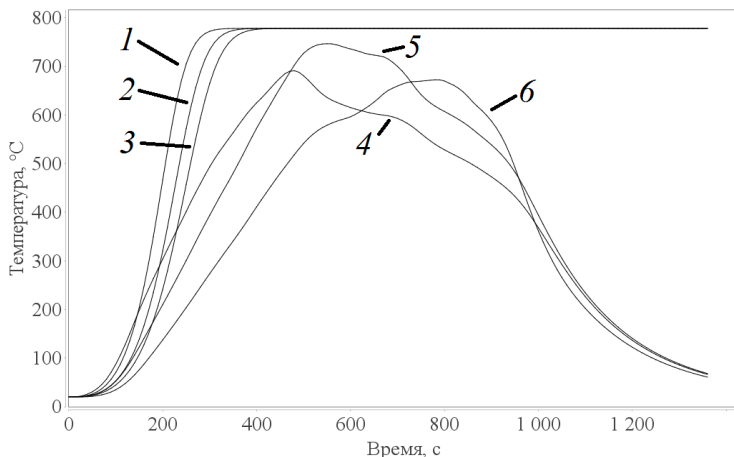


Рис. 3. Распределение температуры в помещении  
в момент времени  $t = 270$  с

На рис. 4 и 5 представлены графики динамики изменения средней температуры и средней оптической плотности дыма в каждой из комнат.

Рис. 4 позволяет также сравнить динамику изменений средней температуры, рассчитанной по предложенной модели, с данными, полученными с помощью модели, представленной в [13]. Как видно из графиков, представленных на рис. 5, полученные по данным моделям результаты соотносятся с приемлемой точностью. Из рис. 4 также следует, что температура достигает максимума сначала в самой левой комнате – комнате 1, потом в средней комнате – комнате 2 и, наконец, в правой комнате – комнате 3. Это логично, так как источник пожара изначально находился в самой левой комнате. В то же время из графиков видно, что максимальная средняя температура за все время пожара во второй комнате выше, чем в первой и третьей комнатах. Это объясняется тем, что к началу

распространения пожара во второй комнате воздух был уже разогрет воздушными потоками из первой комнаты, а также тем, что эта комната не имеет выходов и не является угловой. Теплообмен с окружающей средой в этом случае минимален. В то же время комната 3 остывает быстрее всех, потому что там располагается выход из помещения – открытая дверь. Это обеспечивает наибольшую теплоотдачу из этой комнаты. Интересно, что комната 1, несмотря на более далекое расположение от выхода, остывает чуть быстрее комнаты 2. Это связано с тем, что комната 1 является угловой, что обеспечивает большую отдачу тепла, а также с тем, что пожар в комнате 1 заканчивается раньше.



*Рис. 4. Динамика изменения средней температуры в помещениях: 1, 2, 3 – средние температуры в первой, второй и третьей комнатах соответственно, рассчитанные по модели, представленной в [13]; 4, 5, 6 – средние температуры в первой, второй и третьей комнатах соответственно, рассчитанные с помощью FireSim*



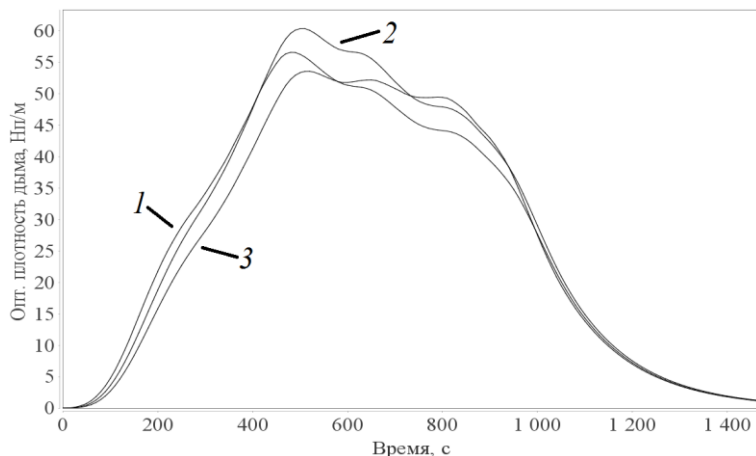


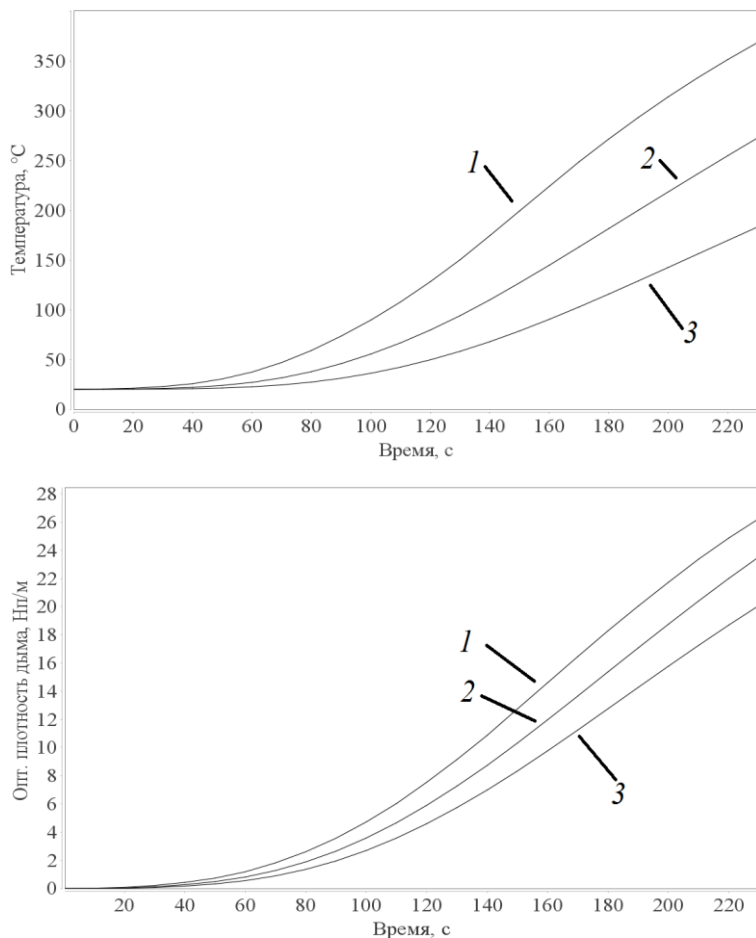
Рис. 5. Динамика изменения средней оптической плотности дыма: 1 – в комнате 1; 2 – в комнате 2; 3 – в комнате 3

Наибольший интерес для исследования представляет начальная стадия пожара, так как именно в это время должна происходить эвакуация из помещения. При дальнейшем развитии пожара температура и загрязненность воздуха продуктами горения достигает критически опасных значений, и проведение эвакуации становится невозможным из-за практически мгновенной гибели эвакуируемых в таких условиях.

На рис. 6 представлен в крупном масштабе начальный участок графика, приведенного на рис. 4 и 5, характеризующего начальную стадию пожара для значений времени от 0 до 220 с.

Из графиков на рис. 6 видно, что температура в комнатах довольно быстро достигает весьма высоких значений. Так, в первой второй и третьей комнатах температура достигает  $100^{\circ}\text{C}$  за время около 105 с, 135 с и 170 с, соответственно, а оптическая плотность дыма значения  $4\text{Нп/м}$  за 95с, 105с и 115с, соответственно. При такой задымленности дальность видимости составляет около половины метра, при такой дальности видимости выбраться из помещения очень сложно даже при хорошем знакомстве с его планом.

При реализации предложенной модели на процессоре Intel Core i5 3470 с 8 Гб RAM за секунду реального времени можно осуществить моделирование процесса развития пожара для двухсекундного интервала времени.



*Рис. 6. Динамика изменения средней температуры и средней оптической плотности дыма вначале пожара:  
1 – в комнате 1; 2 – в комнате 2; 3 – в комнате 3*

## 8. Заключение

Предложена математическая модель динамики развития пожара в помещениях, позволяющая повысить точность и скорость моделирования. Точность моделирования во многом определяется размерами клеток, на которые разбито помещение, и шагом модельного времени при умеренном расходе вычислительных ресурсов на реализацию модели. Разработан программный комплекс с графическим и консольным интерфейсами, который позволяет пользователю осуществлять визуализацию помещений, изменять их размеры и конфигурацию.

Предложенная модель открывает возможности эффективного совместного моделирования развития пожаров и эвакуации людей из помещений. Это позволит по результатам вычислительных экспериментов выдавать рекомендации по изменению геометрических параметров помещений для более оперативной эвакуации людей в случае пожара.

Модель может быть использована в составе тренажерных комплексов для обучения и переподготовки персонала МЧС.

## Литература

1. АМБАРЦУМЯН А.А., БРАНИШТОВ С.А. *Событийные модели управления технологическими процессами ориентированные на защиту от ошибочных действий персонала.* – М.: Гринвич, 2006. – 168 с.
2. *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.*
3. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А. и др. *Критические ситуации в человеко-машинных системах.* – Саратов: Изд-во «ООО Наука», 2015.

4. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А. и др. *Человек. Машина. Среда.* – Саратов: Изд-во «ООО Наука», 2013.
5. РУДНИЦКИЙ В.Н., МЕЛЬНИКОВА Е.А., ПУСТОВИТ М.А. *Распараллеливание и оптимизация выполнения расчетов процесса развития пожара на основе трехмерных клеточных автоматов // Вектор науки ТГУ.* – 2014. – №1. – С. 22–26.
6. СВИРИН И.С. *Обзор моделей распространения пожара в зданиях // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.* – 2013. – №6. – С. 114–129.
7. СИВУХИН Д.В. *Общий курс физики.* – Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Физматлит, 2005. – 544 с
8. *Техническое руководство СИТИС: ВИМ 4.10.* // Строительные информационные технологии и системы ООО «Ситис», 2017. – 23 с.
9. ТУПИКОВ Д.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф. *Подход к построению нечёткой базы знаний для определения пожароопасных ситуаций // Сб. тр. XXIV Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-27). Секции 6, 7, 8 / Под общ. ред. А.А. Большакова.* – Тамбов: ТГТУ, 2014. – Т. 3. – С. 125–127.
10. ТУПИКОВ Д.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., ИВАЩЕНКО В.А. *Алгоритм поддержки принятия решений по устранению пожароопасных ситуаций на промышленных предприятиях // Управление большими системами.* – 2014. – Вып. 52. – С. 148–163.
11. ТУПИКОВ Д.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., ИВАЩЕНКО В.А. *Подход к прогнозированию значений факторов пожароопасных ситуаций // Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2014. – №7. – С. 48–51.

12. ТУПИКОВ Д.В., ИВАЩЕНКО В.А. *Разработка базы знаний для оперативного управления взрыво- и пожароопасным производством* // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – №3(72). – С. 133–137.
13. 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.
14. ХОЛЩЕВНИКОВ В.В., САМОШИН Д.А., ПАРФЕНЕНКО А.П. *Эвакуация и поведение людей при пожарах: учеб. пособ.* – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 261 с.
15. ЦЫГАНОВ В.В., ЧЕБОТАРЕВ П.Ю. *Исследование эффективности графовых метрик при решении задач классификации на стохастических сетях* // Proc. of the 3rd International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2015). – М.: Институт физико-технической информатики, 2016. – С. 298–307.
16. APIECIONEK L., ZARZYCKI H., CZERNIAK J.M., DOBROSIELSKI W.T., EWALD D. *The cellular automata theory with fuzzy numbers in simulation of real fires in buildings* // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 559. – P. 169–182.

## MATHEMATICAL MODEL OF FIRE DYNAMICS DEVELOPMENT IN PREMISES

**Anatolii Tsvirkun**, *Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, leading researcher (tsvirkun@ipu.ru).*

**Alexander Rezhikov**, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, corresponding member of RAS, scientific supervisor (iptmuran@san.ru).*

**Andrey Samartsev**, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, post-graduate (samaand@yandex.ru).*

**Vladimir Ivaschenko**, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, leading researcher (iptmuran@san.ru).*

**Vadim Kushnikov**, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, director (iptmuran@san.ru).*

**Aleksey Bogomolov**, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Candidate of Science, senior researcher (alexbogomolov@ya.ru).*

**Leonid Filimonyuk**, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Candidate of Science, researcher (iptmuran@san.ru).*

*Abstract. A mathematical model of the dynamics of fire in premises is proposed. A significant difference of the model is a reduction in the complexity of calculations and an increase in the accuracy of results due to the use of the principles of cellular automata. The developed software package with support for parallel processes allows you to change the geometry of rooms and display the dynamics of the environment in a fire, which is necessary for planning actions for the elimination of fires and the evacuation of people. Using the proposed model and software package together with known evacuation models will improve the layout of the premises and reduce the time of evacuation in fires.*

**Key words:** mathematical model, model, dynamics of fire development, premises, evacuation.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии М.В. Губко.*

*Поступила в редакцию 16.01.2018.  
Опубликована 31.07.2018.*