

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 3. С. 5–21
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(3):5-21

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.03.5-21>

Алгоритм расчета и построения формы площади пожара в соответствии с тактической моделью расчета

Олег Сергеевич Малютин, Марианна Борисовна Шмырева ✉, Сергей Валерьевич Бабенышев

Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Железнодорожск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Управление боевыми действиями по тушению пожаров требует учета множества факторов, включая форму и размер площади пожара. В оперативной деятельности подразделений пожарной охраны используются упрощенные методы, такие как тактическая модель расчета площади пожара, которая, однако, сложна для реализации в программном обеспечении, особенно применительно к объектам со сложной конфигурацией ограждающих конструкций.

Цели и задачи. Цель работы — получение знаний в области разработки алгоритмов, реализующих тактическую модель расчета формы и площади пожара. Задачи включают анализ существующих методов, разработку алгоритма с учетом времени развития пожара, конфигурации ограждающих конструкций и влияния пожарных стволов, а также создание инструмента для автоматизации расчетов.

Материалы и методы. В основе алгоритма — модифицированный алгоритм Ли, применяемый для моделирования распространения огня в дискретном пространстве. Учитывается линейная скорость распространения огня, зависящая от времени развития пожара и подачи пожарных стволов. Разработан метод опционального перехода от круглой к прямоугольной форме пожара при достижении стен и учет влияния стволов на развитие пожара.

Результаты и обсуждение. Алгоритм показал высокую точность (99 %) в построении формы пожара. Переход к прямоугольной форме при достижении стен соответствует тактической модели. Учет пожарных стволов позволяет моделировать их влияние на развитие пожара. Сравнение с геометрическим методом показало различия в площади пожара менее 1 %. Основные достоинства: соответствие правилам расчетов, применимость к объектам любой сложности, наглядность, учет влияния стволов. Недостатки: неточности контура зоны горения и ускорение развития пожара в сужающихся стенах.

Выводы. Алгоритм эффективен для моделирования площади пожара в соответствии с тактической моделью. Подтверждена гипотеза о возможности использования модифицированного алгоритма Ли. Для дальнейшего развития рекомендуется кроссплатформенная реализация, оптимизация быстродействия и дополнительные эксперименты. Подход применим для прогнозирования оперативной обстановки на объектах различного назначения.

Ключевые слова: площадь пожара; Графис-Тактик; моделирование

Для цитирования: Малютин О.С., Шмырева М.Б., Бабенышев С.В. Алгоритм расчета и построения формы площади пожара в соответствии с тактической моделью расчета // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 3. С. 5–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.34.03.5–21

✉ Шмырева Марианна Борисовна, e-mail: ntc@sibpsa.ru

An algorithm for calculating and constructing the fire area shape according to the tactical calculation model

Oleg S. Malyutin, Marianna B. Shmyreva ✉, Sergey V. Babenyshev

Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Zheleznogorsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Managing firefighting operations requires considering numerous factors, including the shape and size of the fire area. In operational practice, simplified methods such as the tactical fire area calculation model are used. However, implementing this model in software is challenging, especially for objects with complex enclosing structures.

Goals and objectives. The goal of this work is to develop algorithms implementing the tactical model for calculating the shape and area of a fire. The tasks include analyzing existing methods, developing an algorithm that

accounts for fire spread time, the configuration of enclosing structures, and the influence of firefighting equipment, as well as creating a tool for automating calculations.

Materials and methods. The algorithm is based on a modified Lee algorithm, used to model fire spread in a discrete space. It considers the linear fire spread rate, which depends on the fire development time and the deployment of firefighting equipment. A method for transitioning from a circular to a rectangular fire shape upon reaching walls was developed, along with a mechanism to account for the influence of firefighting equipment on fire progression.

Results and discussion. The algorithm demonstrated high accuracy (99 %) in constructing the fire area shape. The transition to a rectangular shape upon reaching walls aligns with the tactical model. Accounting for firefighting equipment allows modelling its impact on fire development. Comparison with the geometric method showed differences in fire area of less than 1 %. Key advantages include compliance with calculation rules, applicability to objects of any complexity, clarity, and consideration of equipment influence. Disadvantages include inaccuracies in the fire zone contour and accelerated fire spread in narrowing walls.

Conclusions. The algorithm is effective for modelling fire areas in accordance with the tactical model. The hypothesis regarding the use of a modified Lee algorithm is confirmed. For further development, cross-platform implementation, performance optimization, and additional experiments are recommended. The approach is applicable for predicting operational scenarios at facilities of various purposes.

Keywords: fire area; GraFiS-Tactic; modelling

For citation: Malyutin O.S., Shmyreva M.B., Babenyshev S.V. An algorithm for calculating and constructing the fire area shape according to the tactical calculation model. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(3):5-21. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.5-21 (rus).

✉ Marianna Borisovna Shmyreva, e-mail: ntc@sibpsa.ru

Введение

Управление боевыми действиями по тушению пожаров является сложнейшей задачей, требующей учета большого количества факторов, связанных с техническими свойствами объекта, физико-химическими особенностями развития пожара и характеристиками привлеченных сил и средств пожарной охраны. Сложность такой системы управления диктует и множество направлений приложения управленческих воздействий с целью успешного решения основной боевой задачи — спасения людей, достижения локализации и ликвидации пожара в кратчайшие сроки (приказ МЧС России¹). Для адекватного выбора управленческих решений требуется не только располагать детальной информацией о складывающейся на пожаре обстановке, но и иметь представление, как она может развиваться в зависимости от тех или иных условий. И главную роль здесь играет форма и размер площади пожара [1].

В оперативной деятельности нет возможности применять сложные модели и связанные с ними программные расчетные комплексы, такие как FDS и Pyrosim [2]. Методы прогнозирования развития обстановки на пожаре, предназначенные для применения в оперативной деятельности, должны быть максимально простыми при сохранении приемлемой точности получаемых результатов. В пожарной тактике для этой цели обычно применяется упрощенный метод расчета площади пожара, который далее будет именоваться «Тактическая модель».

Тактическая модель хорошо известна в пожарной охране России и широко применяется при

проведении расчетов требуемого количества сил и средств непосредственно на месте тушения пожара. Но в большей степени она применяется при составлении документов предварительного планирования боевых действий по тушению пожаров (далее — БДТП), при составлении методических разработок на проведение занятий с личным составом пожарной охраны, анализе пожаров и т.д. [1]. То есть основным назначением тактической модели является предварительная оценка возможной обстановки на месте пожара исходя из конфигурации ограждающих конструкций и некоторого набора параметров распространения пожара, определяемых характером горючей нагрузки (линейная скорость распространения огня, требуемая интенсивность подачи огнетушащих веществ).

В работе [3] показаны достоинства и недостатки тактической модели. Основным ее достоинством является простота. Это свойство позволяет проводить расчеты без привлечения мощных программно-аппаратных комплексов. Закономерности, заложенные в модели, тривиальны и могут быть реализованы с использованием простейших программных средств, таких как табличные редакторы и, потенциально, скриптовые языки программирования (VBA, Python)².

Это соображение делает тактическую модель привлекательной для применения не только непосредственно при тушении пожаров. Она с успехом может быть применена при моделировании параметров пожара при разработке более сложных моделей прогнозирования оперативной обстановки на территории населенных пунктов и предприятий. Так,

¹ Боевой устав подразделений пожарной охраны, определяющий порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ : Приказ МЧС России от 16.10.2017 № 444.

² VanderPlas J. Python Data Science Handbook. Essential Tools For Working With Data. O' Reilly Media, 2016. 548 p. URL: <https://jakevdp.github.io/PythonDataScienceHandbook>

например, в СП 11.131300.2009³ в основу методики определения максимально допустимого расстояния от объекта предполагаемого пожара до ближайшего пожара положена несколько модифицированная тактическая модель [4].

Несмотря на простоту самой тактической модели ее реализация в виде готового к применению приложения для ЭВМ представляет нетривиальную задачу, в том числе и благодаря допущениям и огрублениям расчета, обуславливающего ее простоту. Так, расчет достаточно просто проводить для зданий и помещений прямоугольных форм, однако, в случае сложной конфигурации ограждающих конструкций расчет становится затруднительным. Кроме того, в тактической модели не описывается, каким способом следует проводить расчет в ряде частных случаев (переход к прямоугольным формам в случае незамкнутых ограждающих конструкций и наличия дверных проемов, наличие круглых стен и стен, сходящихся под углами, отличными от прямого и т.д.) [3]. Создание некоего инструмента для решения задачи автоматического моделирования формы и площади пожара с использованием тактической модели позволило бы существенно упростить проведение расчетов применительно как к частным случаям пожаров, так и к сериям вычислительных экспериментов по прогнозированию возможных сценариев развития пожара в рамках моделирования оперативной обстановки на территории населенных пунктов и промышленных предприятий.

Таким образом, объектом исследования, результаты которого приведены в данной статье, является тактическая модель расчета формы и площади пожара. Предметом исследования являются методы расчета и построения формы площади пожара в соответствии с тактической моделью расчета для произвольной формы ограждающих конструкций.

Цель работы — получение знаний в области разработки алгоритмов, реализующих тактическую модель расчета формы и площади пожара.

Известные решения

В отечественных публикациях впервые внимание к проблеме автоматизации расчета площади пожара и хода его тушения было привлечено в работах И.Н. Разливанова [5], предложившего использовать квадратную матрицу, описывающую конфигурацию ограждающих конструкций в сочетании с принципом Гюйгенса для расчета распространения фронта пожара. В работе также реализована упрощенная модель тушения пожара ручными пожарными стволами. В работах С.В. Субачева [6] предложена

стохастическая модель расчета площади пожара, отличающаяся вероятностным характером выбора загорающихся клеток и дополненная интегральной моделью пожара. В работе [7], предшествовавшей упомянутому исследованию, рассматривался геометрический подход к построению площади пожара с использованием модели распространения огня на основе методов теории графов, реализованный в автоматизированной информационно-графической системе ГраФиС-Тактик [8, 9]. Дальнейшее развитие последней привело к появлению подхода, схожего с работами [5, 6], но отличающегося использованием клеточного автомата.

Анализ отечественных работ показал, что наибольшей перспективностью с точки зрения создания алгоритма, реализующего тактическую модель расчета формы и площади пожара, обладает применение подхода, при котором пространство объекта пожара рассматривается как некоторая двухмерная решетка, состоящая из ячеек, отражающих наличие и характер горючей нагрузки, а также ограждающих конструкций. Задача построения площади пожара в таком пространстве может решаться с помощью алгоритмов поиска в ширину, например алгоритма Ли [10], модифицированного не для нахождения кратчайшего пути, а для построения зоны горения по контуру волны поиска. Схожее решение для задачи моделирования последствий аварийных выбросов было предложено в работе [11].

Среди зарубежных следует отметить работы⁴ [12], ориентированные в основном на моделирование природных пожаров. При этом в работе⁵ отмечаются перспективы применения геоинформационных технологий для решения задач моделирования пожаров. В работе [13] предлагается использование клеточных автоматов на основе гексагональной сетки. В докладе [14] приводятся сведения о применении методов машинного обучения для моделирования лесных пожаров. В работе [15] рассматривается метод моделирования пожаров в помещениях с использованием клеточных автоматов. Дальнейшее развитие результаты названной работы получили в статье [16] применительно к моделированию температуры в помещениях. В статье [17] авторы приводят сведения о подходах к визуализации и интерпретации результатов компьютерного моделирования пожаров

⁴ Gonzalez E.A., Leonor M.Ch.G. A Cellular Automaton Approach for Simulating Forest Fires // 9th Science and Technology Congress. De La Salle University Manila, Philippines, 2007. P. 8. URL: https://www.researchgate.net/publication/312529591_A_Cellular_Automaton_Approach_for_Simulating_Forest_Fires

⁵ Gazmeh H., Chehregan A., Alesheikh M.A., Karimi M. Modeling Forest Fire Spread using Cellular Automata, GIS and PSO // Geospatial Engineering Journal. 2013. No. 4 (13). Pp. 71–85. URL: https://www.researchgate.net/publication/262847654_Modeling_Forest_Fire_Spread_using_Cellular_Automata_GIS_and_PSO

³ СП 11.131300.2009. Места дислокации пожарных подразделений. Порядок и методика определения.

в помещениях. В публикации [18] приводятся сведения о методах расчета кромки природных пожаров с использованием методов компьютерного моделирования.

Таким образом основной гипотезой, рассматриваемой в исследовании, являлась идея о том, что построить форму площади пожара, соответствующую тактической модели и учитывающую время развития пожара и конфигурацию ограждающих конструкций, можно с использованием алгоритма Ли, модифицированного с учетом замечаний, приведенных в работе [19].

Материалы и методы

Алгоритм построения площади пожара в соответствии с тактической моделью расчета

Тактическая модель изначально создавалась для того, чтобы максимально упростить задачу построения площади пожара, что было продиктовано необходимостью создания инструмента для быстрой оценки оперативной обстановки на пожаре. Для этого был принят ряд принципиальных допущений:

- принимается, что горящая нагрузка равномерно распределена по всей площади объекта пожара и имеет одинаковые характеристики (линейная скорость распространения огня, требуемая интенсивность подачи воды) в любой отдельно взятой точке;
- изначально фронт пожара распространяется радиально от очага пожара, но при достижении ограждающих конструкций он переходит к прямоугольной форме (рис. 1);
- линейная скорость распространения огня зависит от времени подачи первых пожарных стволов: принимается равной половине табличного значения (в соответствии со справочными данными) [1] в первые 10 мин развития пожара и полной величине вплоть до момента подачи стволов;
- в качестве основного параметра для расчета требуемого расхода огнетушащих веществ (далее — ОТВ) принимается площадь тушения, определяемая условной глубиной тушения приборами подачи воды (5 м для ручных пожарных стволов и 10 для лафетных);
- в случае, если интенсивности подачи ОТВ недостаточно для тушения, линейная скорость распространения огня принимается равной половине табличного значения. Если интенсивности подачи ОТВ достаточно для тушения, рост площади горения прекращается.

Определить текущую линейную скорость распространения огня можно следующим образом [1].

При времени развития пожара менее 10 мин:

$$v_{\text{л}} = 0,5 \cdot v_{\text{л.т}} \quad (1)$$

где $v_{\text{л}}$ — расчетная линейная скорость распространения огня, м/мин;

$v_{\text{л.т}}$ — табличная линейная скорость распространения огня, м/мин.

При времени развития пожара свыше 10 мин и до момента введения пожарных стволов:

$$v_{\text{л}} = 1 \cdot v_{\text{л.т}} \quad (2)$$

При времени развития пожара свыше 10 мин и при условии, что пожарные стволы уже поданы, но их расхода ОТВ недостаточно для локализации пожара:

$$v_{\text{л}} = 0,5 \cdot v_{\text{л.т}} \quad (3)$$

При времени развития пожара свыше 10 мин и при условии, что пожарные стволы уже поданы, их расхода ОТВ достаточно для локализации пожара:

$$v_{\text{л}} = 0. \quad (4)$$

В алгоритме построения площади пожара вся зона объекта пожара рассматривается как дискретное пространство, состоящее из совокупности клеток. Каждая клетка может иметь одно из состояний: быть горящей нагрузкой (свободным пространством) или быть элементом ограждающих конструкций. По клеткам горящей нагрузки огонь может распространяться, по клеткам ограждающих конструкций — нет (рис. 2).

За основу взят алгоритм Ли, модифицированный для построения площади пожара по контуру распространения волн. Использование невзвешенного варианта этого алгоритма, как показывает [19], приводит к получению неправильных геометрических форм. Поэтому был использован взвешенный вариант алгоритма.

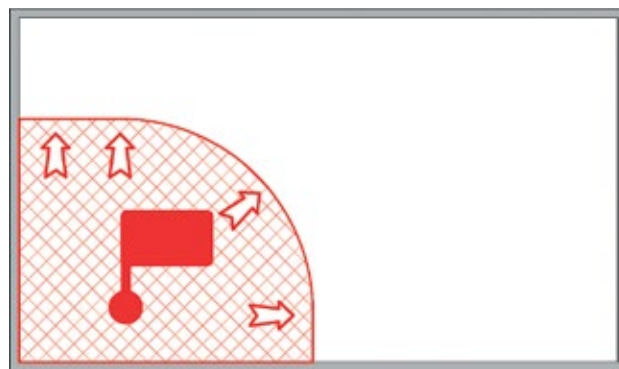


Рис. 1. Пример расчетной площади пожара, полученной с использованием тактической модели

Fig. 1. Example of the calculated fire area obtained using the tactical model

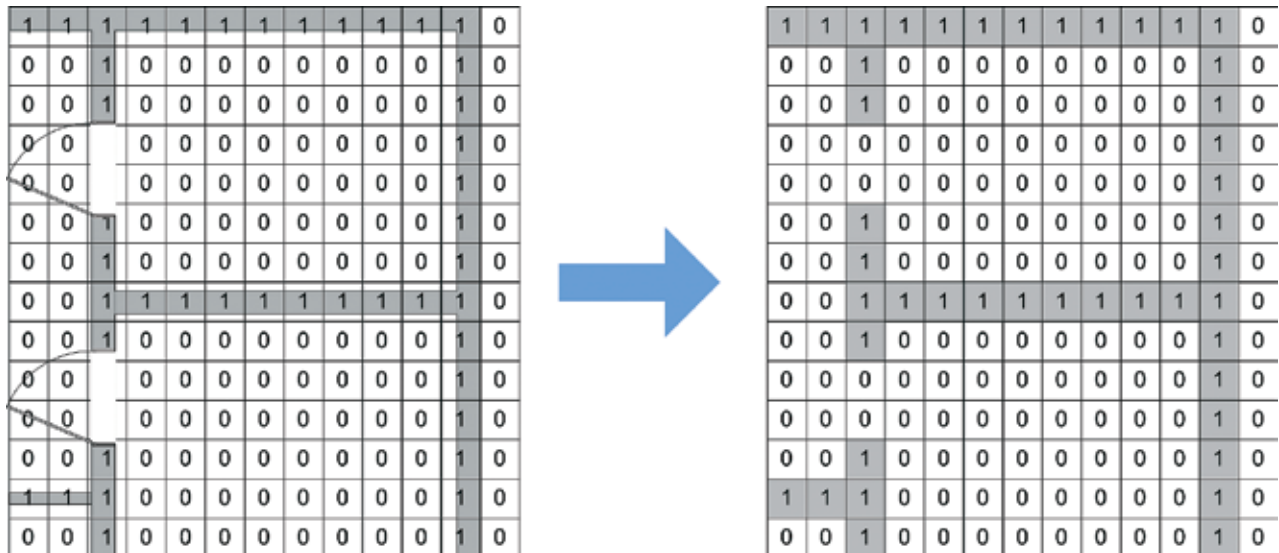


Рис. 2. Интерпретация ограждающих конструкций в матрице окружающего пространства: 1 — клетки непроницаемые для огня; 0 — клетки горючей нагрузки

Fig. 2. Interpretation of enclosing structures in the matrix of the surrounding space: 1 — cells impermeable to fire; 0 — cells of flammable load

Клетки могут загораться, приобретая значение мощности горения в некотором диапазоне, например от 0 до 100.

Если мощность горения клетки превышает некоторое значение, то она начинает распространять горение на смежные клетки горючей нагрузки в окрестности Фон Неймана порядка 1 [20]. При этом мощность передаваемого смежным клеткам горения P_N равна:

$$P_N = k \cdot P_C \cdot K_N, \quad (5)$$

где k — замедляющий коэффициент;

P_C — мощность горения текущей клетки, от которой выполняется расчет влияния на смежные;

K_N — коэффициент расположения клетки — для клеток, расположенных ортогонально по отно-

шению к текущей, $K_N = 0,1$, для клеток, расположенных по диагонали, $K_N = 0,1\sqrt{2} = 0,141$.

Значения K_N были получены исходя из теоремы Пифагора: если принять расстояние между центрами клеток, расположенными ортогонально, равным 1, то расстояние между клетками, расположенными по диагонали, будет равно $\sqrt{2} = 1,41$, а значит влияние, оказываемое на смежные клетки, будет обратно этим величинам (рис. 3). Другими словами, мощность, передаваемая ближе расположенным ортогональным клеткам, будет в 1,41 раза больше, чем мощность, передаваемая клеткам, расположенным по диагонали, так как они расположены дальше.

Расчет состояния клеток выполняется итеративно, т.е. пошагово.

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма расчета распространения горения.

При описании алгоритма использованы следующие термины и обозначения.

Шаг расчета — полный цикл расчета распространения горения для всех клеток коллекции текущей волны за одну итерацию (повторение).

Текущее время (T) — расчетное время модели.

Целевое время ($T_{\text{цель}}$) — время распространения пожара, для которого выполняется моделирование.

Коллекция клеток текущей волны — набор клеток, для которых на текущем шаге производится расчет.

Коллекция клеток новой волны — набор клеток, для которых необходимо будет произвести расчет на следующей итерации. В рамках алгоритма, после завершения каждого шага расчета для коллекции клеток текущей волны, коллекция клеток новой волны становится коллекцией текущей волны.

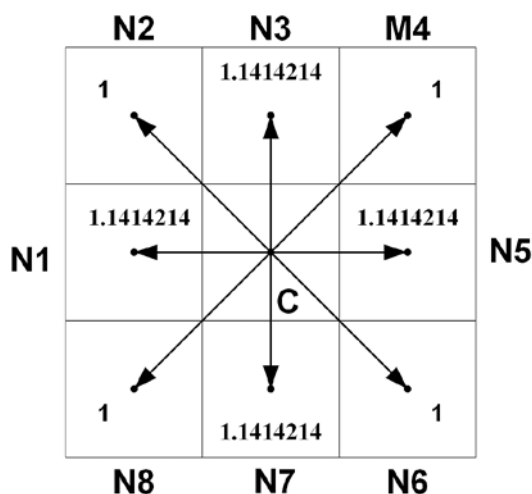


Рис. 3. Влияние расположения клеток на мощность горения

Fig. 3. Effect of cell arrangement on combustion power

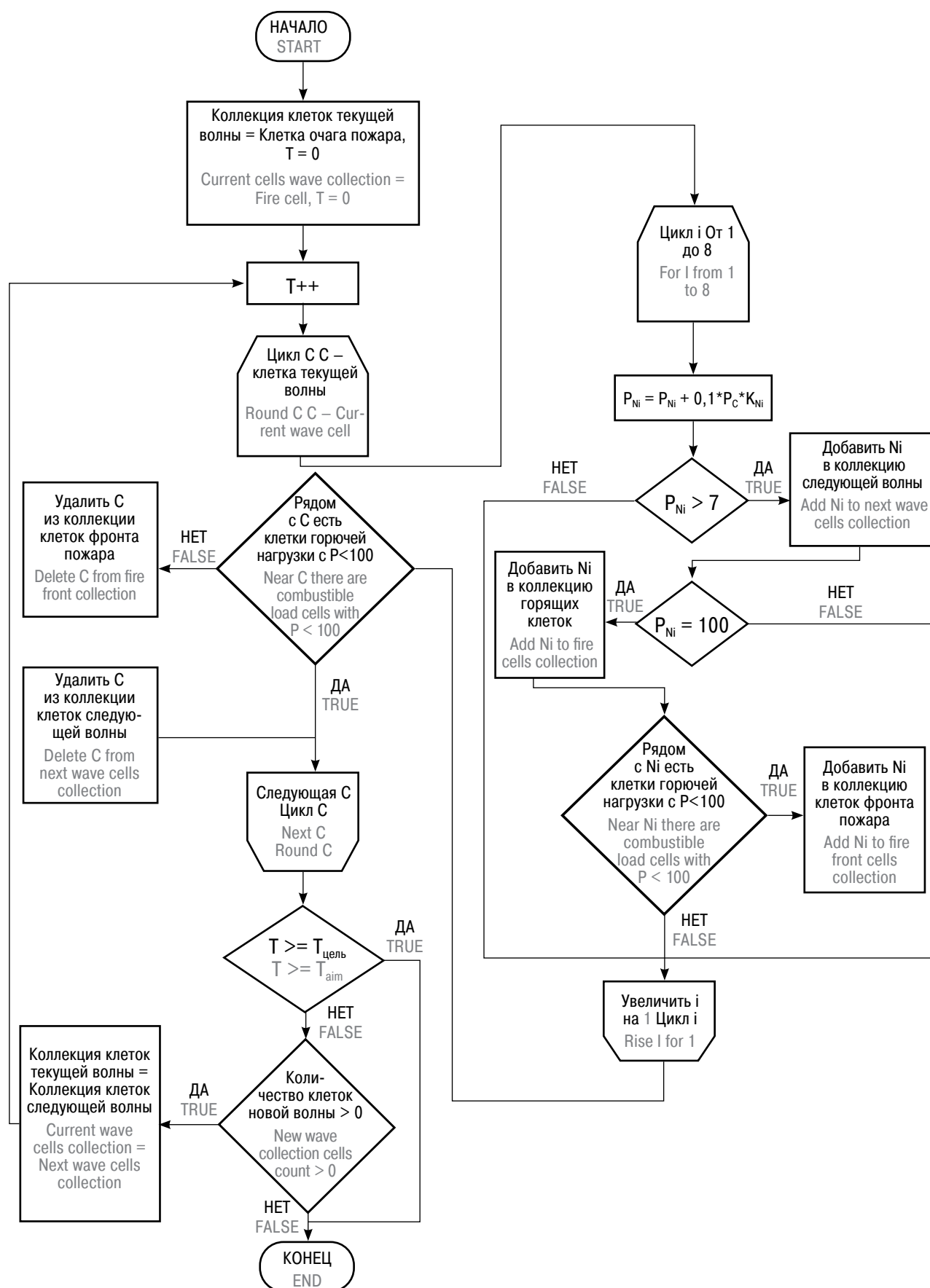


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета распространения горения

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for calculating the spread of combustion

Коллекция горящих клеток — коллекция всех клеток, горящих с максимальной мощностью. Сумма площадей всех клеток коллекции равна площади пожара по состоянию на данный шаг расчета.

Коллекция клеток фронта пожара — коллекция всех клеток, горящих с максимальной мощностью и при этом граничащих с хотя бы одной клеткой горючей нагрузки, у которой мощность горения меньше максимальной.

Клетка текущей волны (C) — клетка, для которой в данный момент выполняется расчет распространения мощности горения на соседние клетки.

Клетка, подверженная влиянию мощности горения — клетка, которой передается мощность горения рассматриваемой клетки текущей волны. В блок-схеме обозначается как N_i , где i — порядковый номер клетки согласно правилу, представленному на рис. 3.

P_C — мощность горения рассматриваемой клетки текущей волны.

P_{N_i} — мощность горения клетки, подверженной влиянию.

K_{N_i} — коэффициент расположения клетки (рис. 3).

Пользователь имеет возможность в любой момент остановить процесс расчета площади пожара, зафиксировав ее состояние. Также он имеет возможность продолжить расчет, используя в качестве стартового состояния зафиксированное ранее.

На рис. 5 приведена визуализация процесса моделирования распространения горения для 6 шагов и соответствующие мощности горения клеток.

На рис. 6 представлен результат расчета для 30 шагов. Видно, что форма пожара близка к правильному кругу. Вычислительные эксперименты с алгоритмом

показали, что точность построения округлой формы составляет 99 %.

После каждого шага расчета из всех клеток, горящих с максимальной мощностью, формируется фигура зоны горения для данного шага. Вычисляется ее площадь, путь, пройденный огнем для данного шага, а в случае наличия поданных на тушение пожарных стволов рассчитывается фактическая площадь тушения, требуемый и фактический расход воды и оценивается возможность дальнейшего распространения огня.

Результат работы алгоритма с учетом ограждающих конструкций представлен на рис. 7.

Переход к прямоугольной форме

Согласно допущениям построения площади пожара в тактической модели, пожар, изначально распространяясь, принимает форму круга, но при достижении ограждающих конструкций переходит к прямоугольной форме (рис. 8).

Решения задачи перехода от круглой формы к прямоугольной ни в одном из рассмотренных источников предложено не было [1, 21]. Не удалось обнаружить решения данной задачи и за рамками контекста пожарной тактики. В связи с этим алгоритм расчета перехода к прямоугольной форме был разработан самостоятельно.

При разработке алгоритма за основу было принято следующее положение: при переходе к прямоугольной форме фронт площади пожара всегда перпендикулярен рассматриваемой ограждающей конструкции.

Таким образом, логика алгоритма заключается в следующем.

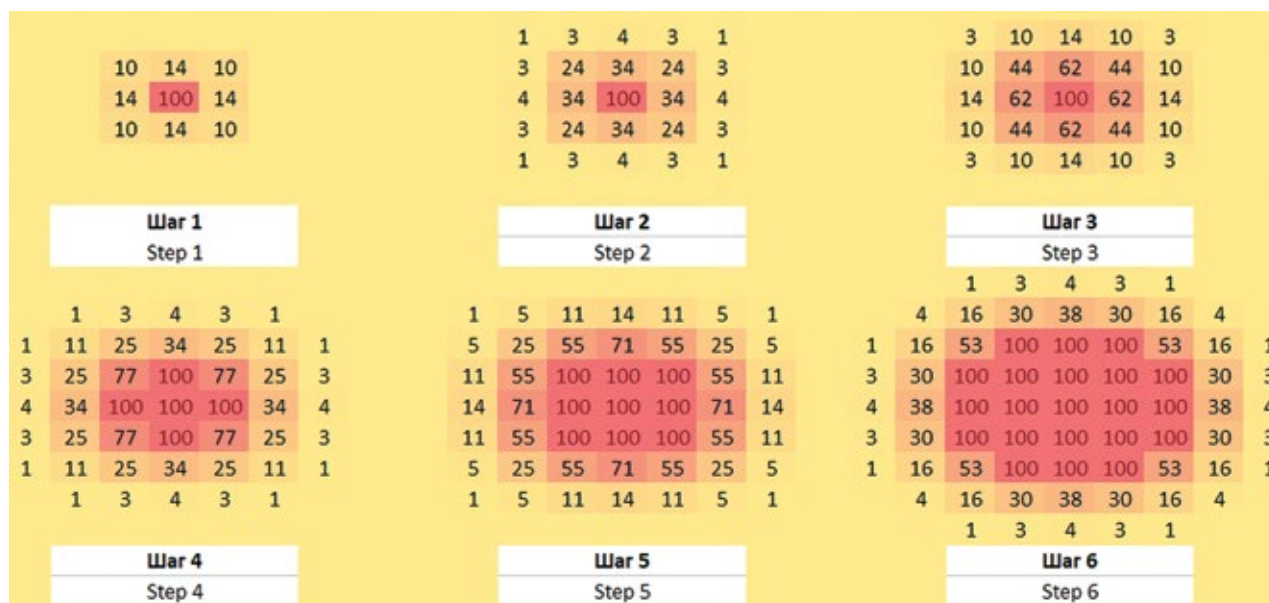


Рис. 5. Рост площади горения для 6 шагов
Fig. 5. Increase in burning area for 6 steps

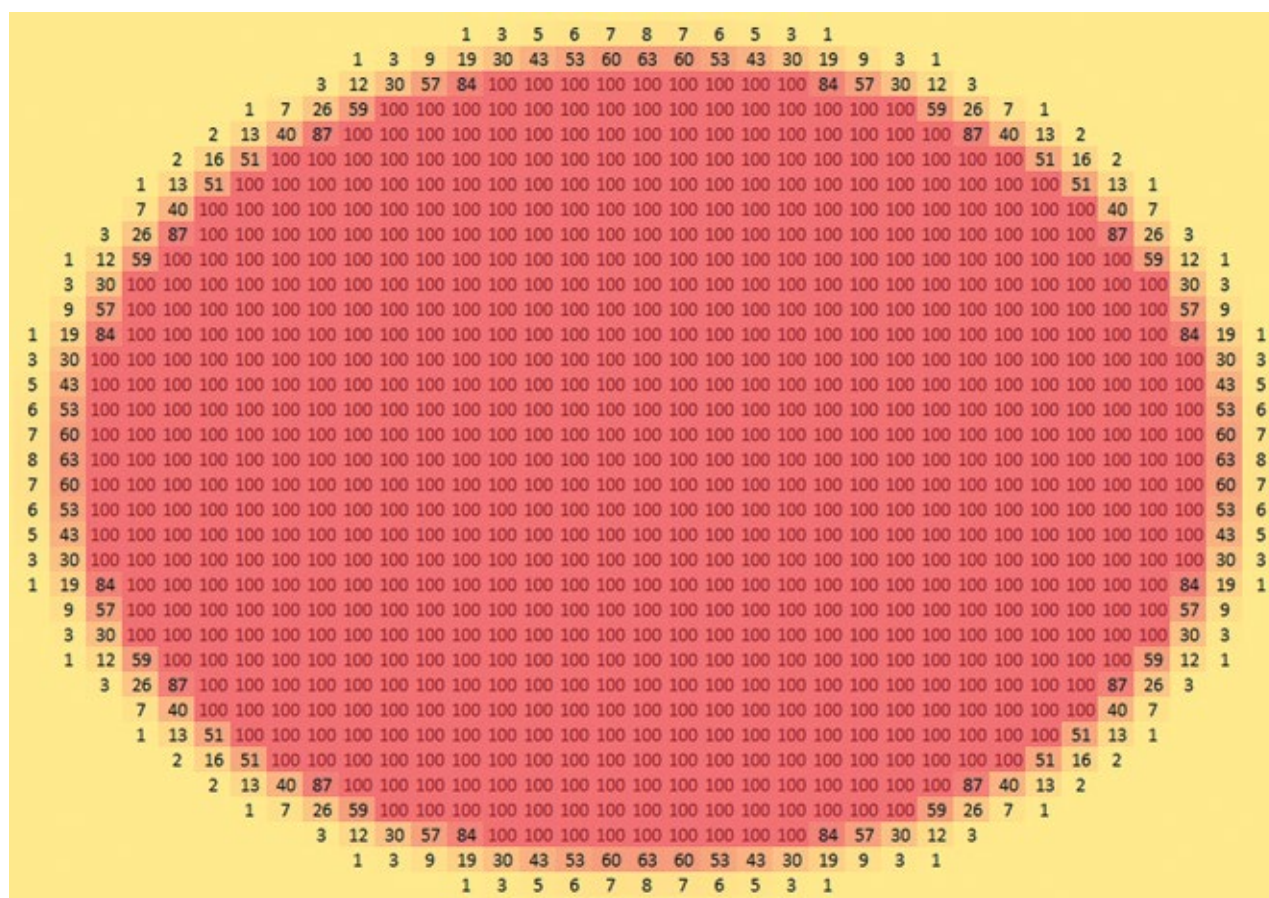


Рис. 6. Результат моделирования зоны горения дискретным клеточным автоматом для 30 шагов

Fig. 6. Result of combustion zone simulation by discrete cellular automaton for 30 steps

1. При достижении зоны горения ограждающей конструкции определяются клетки контакта. Признаком таких клеток является наличие в окрестностях одновременно горящих клеток, клеток ограждающих конструкций и не горящих клеток свободного пространства. На рис. 9 видно, что клетка 0 горит и имеет в своем окружении клетки ограждающих конструкций и клетки свободного пространства (далее — клетка контакта). Все прочие клетки дан-

ным условиям не удовлетворяют: клетки 1 и 2 не имеют в своем окружении клеток открытого пространства, клетки 3 и 4 не имеют в своем окружении клеток ограждающих конструкций, клетка 5 не горит.

2. Начиная от клетки контакта для каждой следующей клетки вдоль ограждающей конструкции проводится проверка — коснется ли проведенный от нее луч, перпендикулярный ограждающей конструкции, зоны горения (рис. 10).

3. В случае если это происходит, все клетки, входящие в этот луч, считаются горящими.

4. Алгоритм заканчивает работу, если луч не коснется зоны горения (рис. 10) или очередная точка окажется за пределами ограждающей конструкции (рис. 11). После этого все клетки зоны, оказавшейся внутри перпендикуляра, добавляются в зону горения. На следующем шаге расчета горение продолжается уже от них.

Итог работы алгоритма в целом можно увидеть на рис. 12.

Учет поданных пожарных стволов

Одним из принципиальных преимуществ метода компьютерного моделирования является возмож-

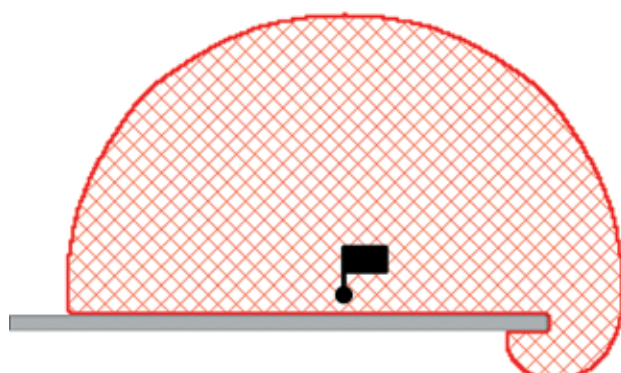


Рис. 7. Результат расчета зоны горения с учетом непроницаемости для огня ограждающих конструкций

Fig. 7. Result of calculation of the combustion zone taking into account the fire impermeability of enclosing structures

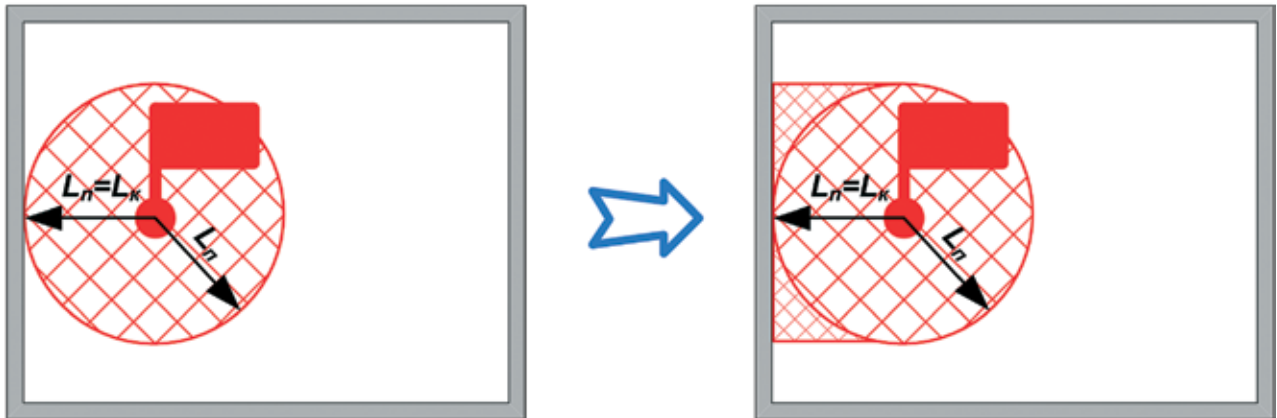


Рис. 8. Переход к прямоугольной форме пожара согласно тактической модели: L_n — путь, пройденный огнем; L_k — расстояние до ограждающих конструкций (стен)

Fig. 8. Transition to a rectangular fire shape, according to the tactical model: L_f — path traveled by fire; L_w — distance to enclosing structures (walls)

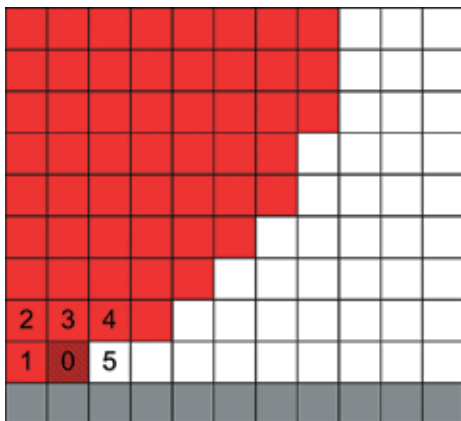


Рис. 9. Определение клетки контакта. Серым цветом выделены клетки ограждающих конструкций, красным — зоны горения, белым — не горящие клетки

Fig. 9. Definition of the contact cell. The cells of enclosing structures are highlighted in gray, the combustion zones are highlighted in red, and the cells that are not burning are highlighted in white

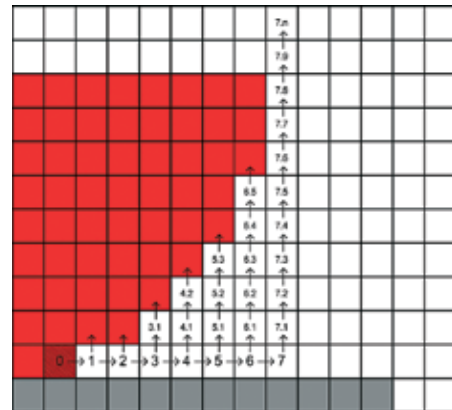


Рис. 10. Переход к прямоугольной форме. Алгоритм завершается, так как луч, перпендикулярный ограждающей конструкции из точки 7, не коснулся зоны горения

Fig. 10. Transition to a rectangular shape. The algorithm ends because the beam perpendicular to the enclosing structure from point 7 did not touch the combustion zone

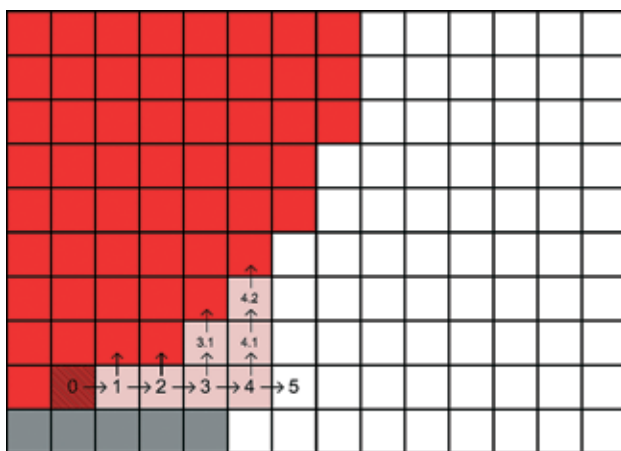


Рис. 11. Алгоритм завершается, так как клетка 5 не имеет в окружении клеток ограждающих конструкций

Fig. 11. The algorithm terminates because cell 5 has no enclosing structures in the surrounding cells

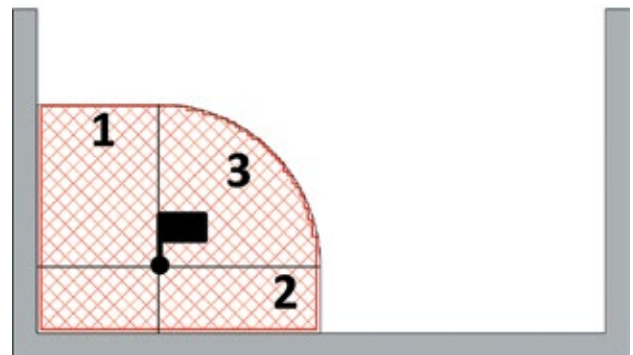


Рис. 12. Работа алгоритма перехода к прямоугольной форме. Сегменты 1 и 2 имеют фронт пожара в виде прямой линии, перпендикулярной ограждающим конструкциям. Сегмент 3 сохранил форму полуокруга

Fig. 12. Operation of the algorithm for transition to a rectangular shape. Segments 1 and 2 have a fire front in the form of a straight line perpendicular to the enclosing structures. Segment 3 retained the shape of a semicircle

ность учитывать влияние на развитие пожара поданных приборов подачи огнетушащих веществ.

Упрощенно алгоритм учета влияния поданных пожарных стволов на рост площади пожара выглядит следующим образом.

1. Перед запуском каждой сессии моделирования определяются расположение и свойства имеющихся пожарных стволов.

2. На каждом шаге моделирования осуществляется проверка пересечения фронта пожара с направлением действия каждого из пожарных стволов. Определяются обрабатываемые участки фронта пожара и стволы, работающие на каждом из них.

3. Для каждого обрабатываемого участка фронта пожара производится расчет размера фрагмента фактической площади тушения. При этом глубина тушения принимается: 5 м для ручных пожарных стволов и 10 м для лафетных пожарных стволов [1].

4. Для каждого обрабатываемого участка фронта пожара, исходя из указанного пользователем в процессе настройки значения требуемой интенсивности подачи воды, определяется требуемый расход воды Q_i^{TP} для локализации горения на данном фрагменте площади тушения.

5. Для каждого обрабатываемого участка фронта пожара суммируются расходы воды из стволов, работающих на данном участке — определяется фактический расход воды Q_i^F .

6. Для каждого обрабатываемого участка фронта пожара сравниваются фактический Q_i^F и требуемый расход воды Q_i^{TP} , если

$$Q_i^F \geq Q_i^{TP}.$$

Дальнейший расчет распространения огня на данном участке производиться не будет — $v_{li} = 0$, если

$$Q_i^F < Q_i^{TP},$$

где Q_i^F — фактический расход воды на i -м участке фронта пожара;

Q_i^{TP} — требуемый расход воды на i -м участке фронта пожара.

Дальнейший расчет распространения огня на данном участке будет производиться только на каждом втором шаге для эмуляции снижения скорости распространения огня в 2 раза в соответствии с формулами (1–4).

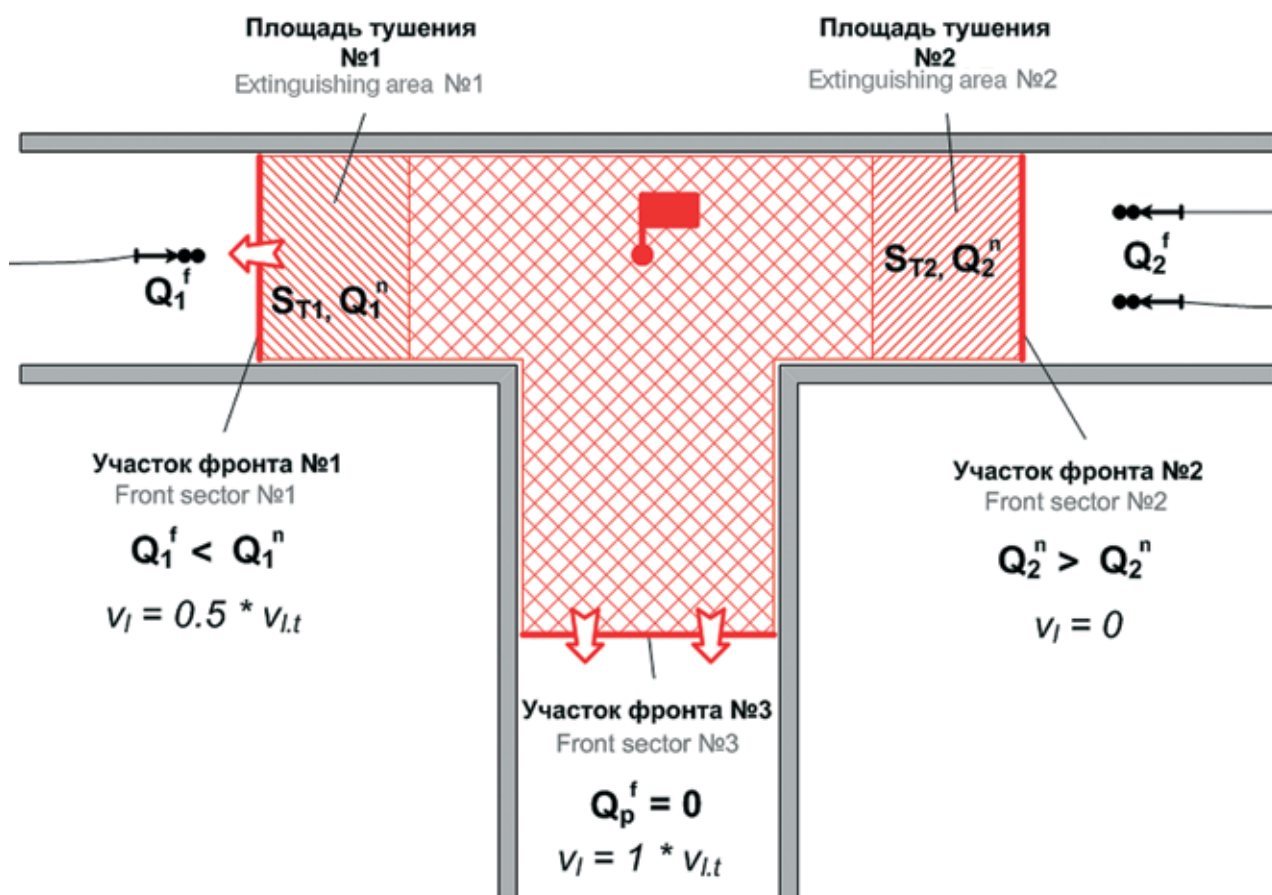


Рис. 13. Влияние расхода из поданных пожарных стволов на распространение пожара на различных участках фронта
Fig. 13. The influence of the flow rate from the supplied fire nozzles on the spread of fire in different areas of the front

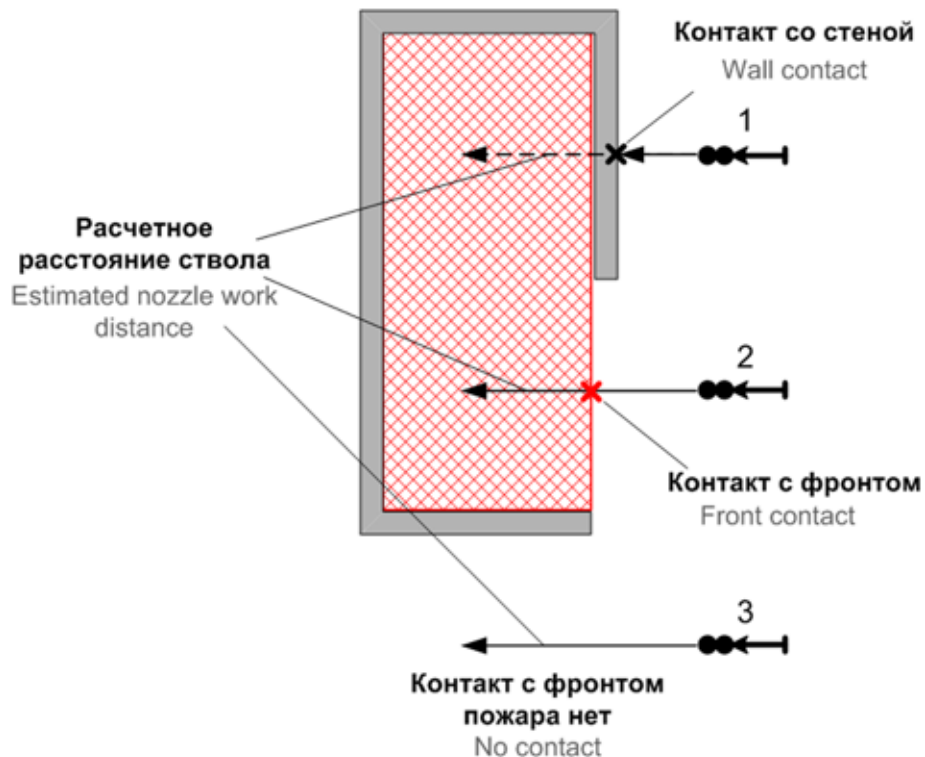


Рис. 14. Ствол № 1 не оказывает влияния на расчет, так как в направлении его работы находится стена. Ствол № 2 влияет на расчет, так как в пределах его расчетного расстояния находится фронт пожара. Ствол № 3 не оказывает влияния на расчет, так как в пределах его расчетного расстояния нет фронта пожара

Fig. 14. Nozzle No. 1 does not affect the calculation, because there is a wall in the direction of its operation. Nozzle No. 2 affects the calculation, because there is a fire front within its calculated distance. Nozzle No. 3 does not affect the calculation, because there is no fire front within its calculated distance

Рассмотрим пример расчета распространения пожара с учетом влияния поданных пожарных стволов, представленный на рис. 13.

На рис. 13 можно увидеть, какое влияние окажет суммарная производительность (фактический расход воды) поданных пожарных стволов:

- на участке фронта пожара № 1 подан один пожарный ствол. Расхода воды недостаточно для прекращения распространения горения на данном направлении. Распространение горения в дальнейшем будет происходить с половиной табличного значения ($v_d = 0,5 \cdot v_{д.т}$);
- на участке фронта пожара № 2 подано два пожарных ствола. Расхода воды достаточно для прекращения распространения огня на данном направлении ($v_d = 0$);
- на участке фронта пожара № 3 стволов не подано — огонь в данном направлении продолжит распространяться ($v_d = 1 \cdot v_{д.т}$).

Необходимо отметить, что ввиду учета влияния приборов фактический путь, пройденный огнем, может оказаться меньше расчетного. При этом он может отличаться для различных участков фронта пожара. Поэтому в случае с расчетом формы площади пожара методом компьютерного моделирова-

ния полагаться на расчетное значение этого параметра как на показатель развития пожара не следует.

Учет влияния стволов на фронт пожара осуществляется следующим образом (рис. 14). От ствола строится условная прямая в направлении работы ствола. В случае если прямая пересекается с фронтом пожара, то считается, что ствол работает на тушение. В случае же если прямая пересекается с фигурой ограждающих конструкций, считается, что ствол находится в другом помещении и вода, подаваемая им, в зону горения не попадает. Такой ствол в расчете не учитывается.

Длина расчетного расстояния работы ствола по умолчанию равна глубине тушения стволов: 5 для ручных и 10 м для лафетных.

Пример расчета и сравнение результатов, полученных методами расчета и построения формы площади пожара

Для сравнения описанных в предыдущих разделах методов произведем расчеты обоими методами на конкретном примере.

Для помещения, представленного на рис. 15, был проведен расчет для следующих условий:

- линейная скорость распространения огня — 1 м/мин;

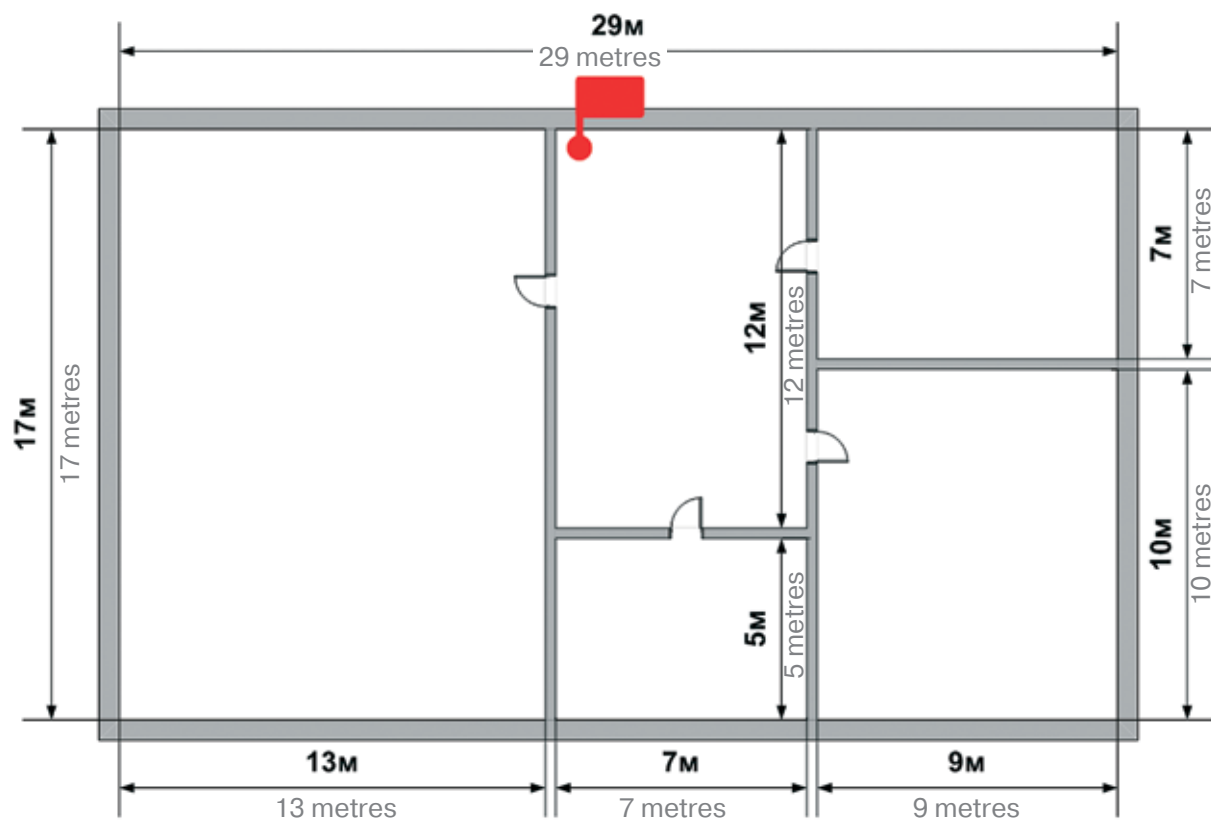


Рис. 15. Конфигурация ограждающих конструкций для расчета
Fig. 15. Configuration of enclosing structures for calculation

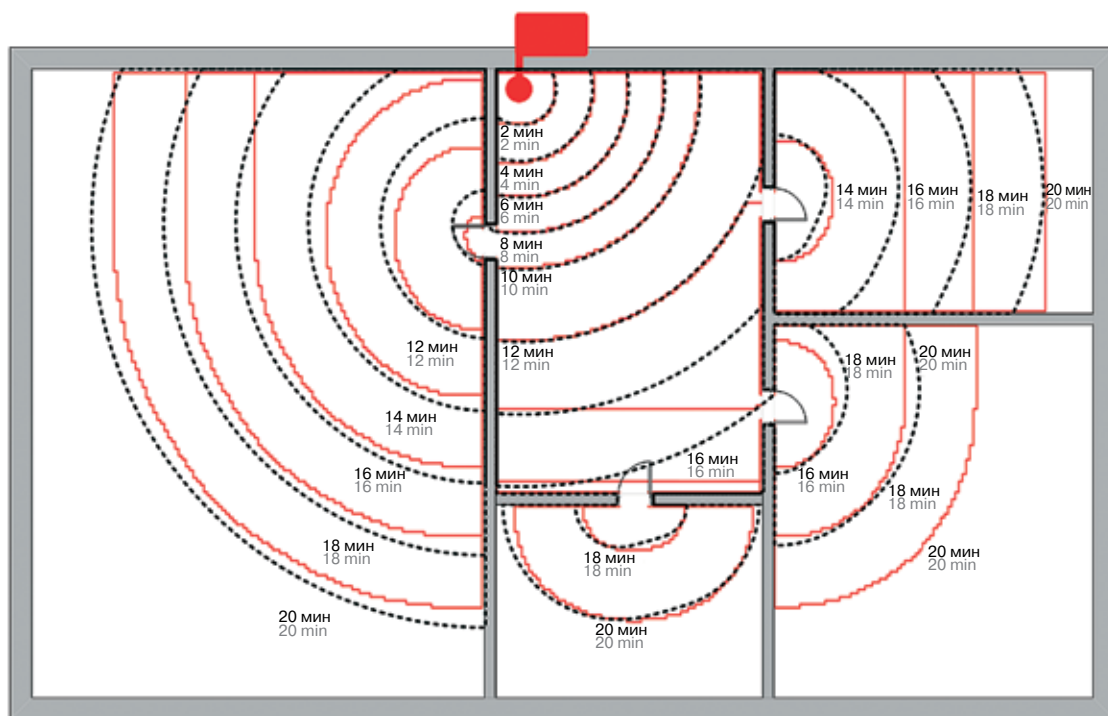


Рис. 16. Сравнение форм площади пожара, полученных с использованием различных методов расчета. Красная сплошная линия — площадь, полученная методом компьютерного моделирования. Черная пунктирная линия — площадь, полученная геометрическим методом
Fig. 16. Comparison of fire area shapes obtained using different calculation methods. Red solid line — area obtained by computer modelling. Black dotted line — area obtained by geometric method

Сравнение результатов расчета и построения формы площади пожара, полученных различными методами
Comparison of the results of calculation and construction of the shape of the fire area obtained by different methods

Метод* Method*	Площадь пожара (м ²) на момент времени (мин) Fire area (m ²) at the time (min)									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
1	2	6	11	18	28	61	107	167	233	316
2	2	6	11	17	26	56	103	172	235	319

* 1 — метод геометрических построений, 2 — метод компьютерного моделирования.

* 1 — method of geometric constructions; 2 — method of computer modelling.

- время расчета 20 мин;
- шаг моделирования 2 мин.

Расчет проводился с помощью Автоматизированной информационно-графической системы Гра-ФиС-Тактик [9], в которой реализован описанный в данной работе алгоритм, а также геометрический метод построения [7] (рис. 16).

Численные значения площади пожара приведены в таблице.

Рассматривая представленные на рис. 16 и в таблице результаты, можно заметить, что в целом отличия между ними незначительны. Разница в полученных значениях площади пожара на момент 20 мин составляет менее 1 %, что в условиях приближенности пожарно-тактических расчетов представляется несущественным.

Вместе с тем можно отметить, что в отдельных случаях контур площади пожара, полученный при помощи метода компьютерного моделирования, опережает контур, полученный при помощи метода геометрических построений. Связано это с тем, что при компьютерном моделировании реализован переход площади пожара к прямоугольной форме при достижении ограждающих конструкций. Как результат, в отдельных случаях мгновенный переход к прямоугольной форме влечет резкое увеличение площади пожара и перемещение вперед фронта пожара. В данном случае такое увеличение произошло в момент времени 14 мин, когда резкий переход к прямоугольной форме пожара привел к тому, что одна из дверей оказалась в зоне горения. В то же время, согласно методу геометрических построений, эта же дверь оказалась в зоне горения только к 16 мин, что и привело к отставанию фронта пожара при переходе в смежное помещение.

В целом, с учетом незначительной разницы в итоговых значениях площади пожара, оба метода могут быть в равной степени использованы при проведении пожарно-тактических расчетов.

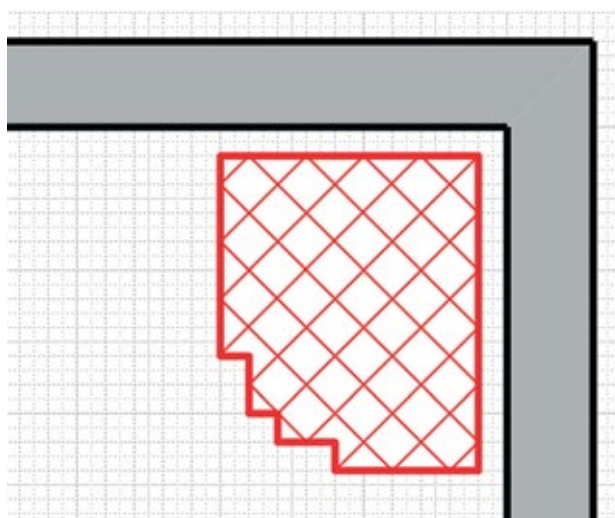


Рис. 17. Возможные неточности формирования итоговой фигуры «Зона горения» — несоответствие контура площади пожара контуру ограждающих конструкций и «зубчатая» структура контура площади пожара

Fig. 17. Possible inaccuracies in the formation of the final figure “Combustion Zone” — discrepancy between the outline of the fire area and the outline of the enclosing structures and the “jagged” structure of the outline of the fire area

Результаты и их обсуждение

Основными достоинствами метода расчета формы площади пожара при помощи компьютерного моделирования являются:

1. Высокая степень соответствия правилам проведения пожарно-тактических расчетов, принятым в Российской Федерации.
2. Наглядность процесса моделирования распространения пожара.
3. Учет влияния на процесс распространения огня приборов подачи ОТВ.
4. Возможность создания на базе реализованной модели, использующей матрицу окружающего пространства, более сложных моделей распространения огня.

В качестве недостатков предложенного алгоритма можно назвать следующие наблюдения.

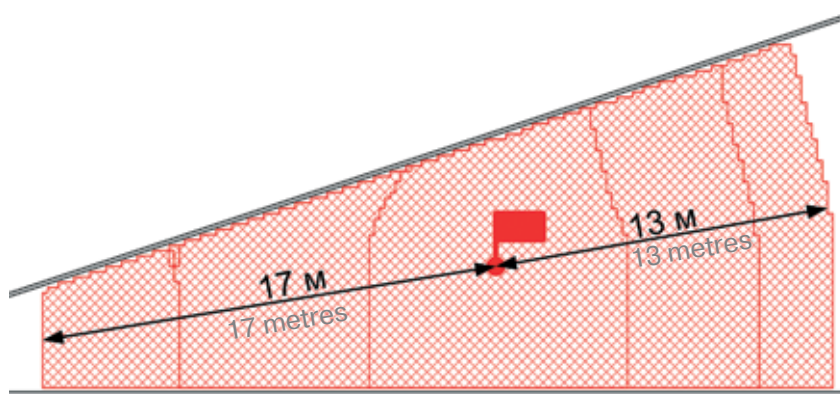


Рис. 18. Увеличение пути, пройденного огнем в условиях сужающихся стен
Fig. 18. Increasing the fire path in narrowing wall conditions

1. Использование клеточной структуры пространства приводит к тому, что в процессе формирования итоговой фигуры зоны горения могут возникать различные неточности (рис. 17). Так, например, контур итоговой фигуры может неточно совпадать с контуром ограждающих конструкций. Также контур получаемой фигуры имеет характерный «зубчатый» край. Однако этот недостаток наиболее ярко проявляется при значительных размерах зерна.

2. Различные негативные проявления Торцевое эффекта. Эти проявления также могут быть во многом минимизированы за счет уменьшения размера зерна матрицы.

3. Ускорение развития пожара в условиях стен, сужающихся под острым углом (рис. 18).

Этот эффект является следствием перехода к прямоугольным формам от разных стен, что приводит к опережению фронта пожара достраиваемыми при переходе фрагментами фронта.

Заключение

Описанный в работе алгоритм показал высокую гибкость в решении задачи моделирования пожара в соответствии с тактической моделью развития пожара. Полученные формы и размеры площади пожара в полной мере согласуются с правилами рас-

чета, определяемыми тактической моделью, а также не противоречат результатам, получаемым с использованием геометрической модели построения [7].

Алгоритм и его реализация в АИГС ГраФиС-Тактик [9] делают возможным не только учет ограждающих конструкций любой степени сложности, но также и учет в расчете влияния поданных пожарных стволов. Прочих реализаций данной особенности тактической модели неизвестно.

Таким образом, выдвинутая в начале работы гипотеза, что построить форму площади пожара, соответствующую тактической модели и учитывающую время развития пожара и конфигурацию ограждающих конструкций, можно с использованием алгоритма Ли, модифицированного с учетом замечаний, приведенных в работе [22], на основании результатов компьютерного моделирования, может быть принята как подтвержденная.

Направлениями дальнейшего совершенствования данного решения можно назвать:

- разработку кроссплатформенной программной реализации алгоритма;
- совершенствование алгоритма в части повышения быстродействия;
- проведение вычислительных экспериментов по оценке ожидаемых параметров развития пожаров в зданиях различных категорий и назначения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Теребнев В.В.* Пожарно-тактические расчеты. Екатеринбург : ООО «Издательство «Калан», 2017. 104 с.
2. *Anderson J., Sjoström J., Temple A., Charlier M., Dai X., Welch S. et al.* FDS simulations and modelling efforts of travelling fires in a large elongated compartment // 15th International Interflam Conference. London, UK, 2019. Pp. 2085–2094. URL: https://www.researchgate.net/publication/337180149_FDS_simulations_and_modelling_efforts_of_travelling_fires_in_a_large_elongated_compartment
3. *Малютин О.С.* Проблемы использования принятого в пожарной тактике метода построения прогнозируемой площади пожара // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2016. № 1. С. 7–13. URL: <http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2016/v1/7-13.pdf>
4. *Матюшин А.В., Порошин А.А., Матюшин Ю.А., Бобринев Е.В., Кондашов А.А.* Проектирование размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах с использованием геоинформаци-

- онных технологий // *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. 2013. № 3 (31). С. 81–86. DOI: 10.12845/bitp.31.3.2013.9. EDN SBOQIR.
5. *Разливанов И.Н.* Математическое моделирование процессов развития и пожаротушения в условиях ограниченности сил и средств : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 185 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004256340
 6. *Субачев С.В., Субачева А.А.* Имитационное моделирование развития и тушения пожаров в системе подготовки специалистов противопожарной службы // *Прикладная информатика*. 2008. № 4 (16). С. 27–37. EDN JVIGMN.
 7. *Малютин О.С., Хабибулин Р.Ш.* Алгоритм построения прогнозируемой площади пожара в тактической модели с использованием теории графов // *Проблемы техносферной безопасности : мат. III Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов*. М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. № 3. С. 67–69. EDN KEQYWC.
 8. *Малютин О.С.* Объектно-информационное моделирование оперативно-тактических действий // *Проблемы техносферной безопасности : мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов-2015*. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. № 4. С. 466–469. EDN MRPNJA.
 9. *Малютин О.С., Елфимова М.В., Мельник А.А., Батуро А.Н.* Перспективы развития системы ГраФиС как системы поддержки принятия управленческих решений при тушении пожаров // *Вестник Воронежского института ГПС МЧС России*. 2018. № 1 (26). С. 71–78.
 10. *Lee C.Y.* An Algorithm for Path Connections and Its Applications // *IRE Transactions on Electronic Computers*. 1961. No. 3 (10). Pp. 346–365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222
 11. *Матвеев Ю.Н., Чернышов Л.О.* Модификация алгоритма фронтального моделирования последствий аварийных выбросов на основе эмпирико-статистического подхода // *Программные продукты и системы*. 2024. № 1 (37). С. 95–104. DOI: 10.15827/0236-235X.145.095-104. EDN QTAEND.
 12. *Albini F.A.* A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by-Radiation // *Combustion Science and Technology*. 1985. No. 5 (42). Pp. 229–258. DOI: 10.1080/00102208508960381
 13. *Encinas A.H., White S.H., del Rey A.M., Sánchez R.* Modeling forest fire spread using hexagonal cellular automata // *Applied Mathematical Modelling*. 2007. No. 31 (6). Pp. 1213–1227. DOI: 10.1016/j.apm.2006.04.001
 14. *Li F., Zhu Q., Riley W.J., Zhao L., Xu L., Yuan K. et al.* AttentionFire_v1.0: interpretable machine learning fire model for burned area predictions over tropics // *Geoscientific Model Development*. 2023. No. 3 (16). Pp. 869–884. DOI: 10.5194/gmd-2022-195
 15. *Riatma G.P., Yuniarno E.M., Nugroho S.M.S.* Closed Room Fire Propagation Modelling Using Multiple State Variables Cellular Automata // *2018 International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia (CENIM)*, Surabaya, Indonesia. 2018. Pp. 204–207. DOI: 10.1109/CENIM.2018.8711360
 16. *Liebert A., Palani A., Rensmeyer T., Breuer M., Niggemann O.* CNN-based Temperature Dynamics Approximation for Burning Rooms // *IFAC-PapersOnLine*. 2004. No. 4 (58). Pp. 420–425. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.07.254
 17. *Govindarajan J., Ward M., Barnett J.* Visualizing simulated room fires, *Proceedings Visualization '99* (Cat. No. 99CB37067). San Francisco, CA, USA, 1999. Pp. 475–565. DOI: 10.1109/VISUAL.1999.809936
 18. *Serón F.J., Gutiérrez D., Magallón J., Ferragut L., Asensio M.I.* The evolution of a WILDLAND forest FIRE FRONT // *The Visual Computer*. 2005. No. 21. Pp. 152–169. DOI: 10.1007/s00371-004-0278-7
 19. *Малютин О.С.* Прогнозирование возможной площади пожара с применением клеточных автоматов // *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2018. № 2 (9). С. 24–28. EDN XTXQGD.
 20. *Breukelaar R., Bäck Th.* Using a genetic algorithm to evolve behavior in multi dimensional cellular automata: emergence of behavior // *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO05)*. New York, NY, USA : ACM, 2005. Pp. 107–114. DOI: 10.1145/1068009.1068024
 21. *Соколов С.В., Субачев С.В.* Имитационная система моделирования развития и тушения пожара в здании и разработка на ее основе тренажера по организации тушения пожаров // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2008. № 2. С. 102–106. EDN JTFQEV.

REFERENCES

1. *Terebnev V.V.* *Fire-tactical calculations*. Yekaterinburg, Kalan Publishing House, LLC. 2017; 104. (rus).
2. *Anderson J., Sjoström J., Temple A., Charlier M., Dai X., Welch S. et al.* FDS simulations and modelling efforts of travelling fires in a large elongated compartment. *15th International Interflam Conference*. London, UK, 2019; 2085–2094. URL: https://www.researchgate.net/publication/337180149_FDS_simulations_and_modelling_efforts_of_travelling_fires_in_a_large_elongated_compartment
3. *Malyutin O.S.* Fire square tactical scheme build method usage problems. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2016; 1:7–13. URL: <http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2016/v1/7-13.pdf> (rus).

4. Matyushin A.V., Poroshin A.A., Matyushin Y.A., Bobrinev E.V., Kondashev A.A. Designing of Fire Service Divisions Location in Settlements Using GIS Technologies. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. 2013; 3(31):81-86. DOI: 10.12845/bitp.31.3.2013.9. EDN SBOQIR. (rus).
5. Razlivanov I.N. *Mathematical modeling of processes of development and fire extinguishing under conditions of limited forces and resources : abstract of the Dissertation of the candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2009; 185. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004256340 (rus).
6. Subachev S.V., Subacheva A.A. Simulation modeling of fire development and extinguishing in the system of training fire service specialists. *Applied Computer Science*. 2008; 4(16):27-37. EDN JVIGMN. (rus).
7. Malyutin O.S., Khabibulin R.Sh. Algorithm for constructing a predicted fire area in a tactical model using graph theory. *Problems of technosphere safety : materials of the 3rd international scientific and practical conference of young scientists and specialists*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2014; 3:67-69. EDN KEQYWC (rus).
8. Malyutin O.S. Object-informational modeling of actions of fire units. *Problems of technosphere safety : materials of the 4th international scientific and practical conference of young scientists and specialists*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2015; 4:466-469. EDN MRPNJA (rus).
9. Malyutin O.S., Elfimova M.V., Melnik A.A., Baturo A.N. Automated informational-graphical system GraFiS as decision support system development perspectives. *Bulletin of the Voronezh Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2018; 2(19):71-78. (rus).
10. Lee C.Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications. *IRE Transactions on Electronic Computers*. 1961; 3(10):346-365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222
11. Matveev Yu.N., Chernyshev L.O. Modifying the algorithm for frontal modeling of accidental release consequences based on the empirical and statistical approach. *Software & Systems*. 2024; 1(37):95-104. DOI: 10.15827/0236-235X.145.095-104. EDN QTAEND. (rus).
12. Albin F.A. A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by-Radiation. *Combustion Science and Technology*. 1985; 5(42):229-258. DOI: 10.1080/00102208508960381
13. Encinas A.H., White S.H., del Rey A.M., Sánchez R. Modeling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling*. 2007; 31(6):1213-1227. DOI: 10.1016/j.apm.2006.04.001
14. Li F., Zhu Q., Riley W.J., Zhao L., Xu L., Yuan K. et al. AttentionFire_v1.0: interpretable machine learning fire model for burned area predictions over tropics. *Geoscientific Model Development*. 2023; 3(16):869-884. DOI: 10.5194/gmd-2022-195
15. Riatma G.P., Yuniarno E.M., Nugroho S.M.S. Closed Room Fire Propagation Modelling Using Multiple State Variables Cellular Automata. *2018 International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia (CENIM)*. Surabaya, Indonesia, 2018; 204-207. DOI: 10.1109/CENIM.2018.8711360
16. Liebert A., Palani A., Rensmeyer T., Breuer M., Niggemann O. CNN-based Temperature Dynamics Approximation for Burning Rooms. *IFAC-PapersOnLine*. 2004; 4(58):420-425. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.07.254
17. Govindarajan J., Ward M., Barnett J. Visualizing simulated room fires. *Proceedings Visualization '99 (Cat. No. 99CB37067)*. San Francisco, CA, USA. 1999; 475-565. DOI: 10.1109/VISUAL.1999.809936
18. Serón F.J., Gutiérrez D., Magallón J, Ferragut L., Asensio M.I. The evolution of a WILDLAND forest FIRE FRONT. *The Visual Computer*. 2005; 21:152-169. DOI: 10.1007/s00371-004-0278-7
19. Malyutin O.S. Forecasting the potential fire area using cellular automata. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2018; 2(9):24-28. EDN XTXQGD (rus).
20. Breukelaar R., Bäck Th. Using a genetic algorithm to evolve behavior in multi dimensional cellular automata: emergence of behavior. *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO05)*. New York, NY, USA ACM, 2005; 107-114. DOI: 10.1145/1068009.1068024
21. Sokolov S.V., Subachev S.V. Simulation system for modeling the development and extinguishing of a fire in a building and the development of a simulator for organizing fire extinguishing on its basis. *Problems of safety and emergency situations*. 2008; 2:102-106. EDN JTFQEV. (rus).

Поступила 21.01.2025, после доработки 12.05.2025;

принята к публикации 14.05.2025

Received January 21, 2025; Received in revised form May 12, 2025;

Accepted May 14, 2025

Информация об авторах

МАЛЮТИН Олег Сергеевич, подполковник внутренней службы, начальник отдела информационных технологий и компьютерного моделирования научно-технического центра,

Information about the authors

Oleg S. MALYUTIN, Lieutenant Colonel of the Internal Service, Head of the Informational Technologies and Computer Modelling Unit, ScienceTechnical Center, Siberian Fire and Rescue Aca-

Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; Россия, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Северная, 1; ORCID: 0000-0001-5543-1324; e-mail: itikm.sibpsa@yandex.ru

ШМЫРЕВА Марианна Борисовна, подполковник внутренней службы, к.э.н., заместитель начальника научно-технического центра, Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; Россия, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Северная, 1; ORCID: 0000-0002-5485-324X; e-mail: ntc@sibpsa.ru

БАБЕНЫШЕВ Сергей Валерьевич, канд. физ.-матем. наук, профессор кафедры физики, математики и информационных технологий, Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; Россия, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Северная, 1; ORCID: 0000-0002-1784-0837; e-mail: sergei.babyonyshev@mail

Вклад авторов:

Малютин О.С. — *проведение исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.*

Шмырева М.Б. — *введение; обзор существующих решений; актуальность.*

Бабенышев С.В. — *визуализация представленных материалов; обоснование алгоритма.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

demy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Severnaya St., 1, Krasnoyarskiy Kray, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation; ORCID:0000-0001-5543-1324; e-mail: itikm.sibpsa@yandex.ru

Marianna B. SHMYREVA, Lieutenant Colonel of the Internal Service, Cand. Sci. (Economics), Deputy Head of the Scientific and Technical Center, Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Severnaya St., 1, Krasnoyarskiy Kray, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5485-324X; e-mail: ntc@sibpsa.ru

Sergey V. BABENYSHEV, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics, Mathematics and Information Technology, Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Severnaya St., 1, Krasnoyarskiy Kray, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1784-0837; e-mail: sergei.babyonyshev@mail.ru

Contribution of the authors:

Malyutin O.S. — *conducting research; writing the main text; writing the draft; final conclusions.*

Shmyreva M.B. — *introduction; overview of existing solutions; relevance.*

Babenyshev S.V. — *visualization of the presented materials; justification of the algorithm.*

The authors declare that there is no conflict of interest.