

РАЗДЕЛ III

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 614.84

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА НА ОБЪЕКТАХ ХРАНЕНИЯ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ И ВООРУЖЕНИЯ

А.Л. Ахтулов¹, Л.Н. Ахтулова¹, А.Е. Любаков¹, Л.А. Иванова²

¹Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия;

²Омский государственный технический университет, Омск, Россия.

Аннотация. В статье рассмотрены основные модели пожара, позволяющие оценить влияние опасных факторов пожара: интегральная модель; дифференциальная (полевая) модель. Предложен алгоритм последовательно-одиночного размещения для комплектования сложной структуры системы пожарной безопасности объекта. Представлен расчет развития опасных факторов пожара во времени при горении твердотопливного заряда, оценка значений основных характеристик. Результаты показали хорошее совпадение экспериментальных и теоретических исследований.

Ключевые слова: вооружение и военная техника, твердотопливный заряд, горение, математическая модель пожара, опасные факторы, начальная стадия пожара.

Введение

В настоящее время как в научных исследованиях, так и при расследовании пожаров широкое применение получили методы математического моделирования процессов горения [1-5]. Развитие теории математического моделирования описания горения связано с увеличением мощности вычислительной техники, что значительно сократило все виды ресурсов и обеспечило повышение точности описания объекта при моделировании. Одним из направлений математического моделирования при исследовании динамики пожара является создание алгоритмов тестирования элементов автоматической пожарной сигнализации [5-7]. Процесс натурных испытаний достаточно опасен и всегда трудоемок, поэтому машинный эксперимент с использованием математических моделей более безопасен и требует меньших затрат.

В данной работе предлагаемое решение задачи математического моделирования позволяет получить динамику развития опасных факторов пожара при различных условиях машинного эксперимента. Как известно, к опасным факторам пожара, воздействующим на людей [8] и имущество, относятся [7,9]: пламя и искры; тепловой

поток; повышенная температура окружающей среды; повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения; пониженная концентрация кислорода и снижение видимости в дыму.

Процессы горения различных веществ имеют некоторые общие закономерности, однако, могут резко отличаться по динамике развития и по факторам пожара, поэтому для проведения огневых испытаний элементов автоматической пожарной сигнализации были утверждены несколько наиболее характерных моделей [6], с помощью которых и проводятся огневые испытания. Нормативные требования предусматривают шесть видов тестовых очагов пожара с разнообразными характеристиками [9].

Таким образом, цель данной работы заключается в построении математических моделей наиболее характерных очагов пожара, а также в выявлении характерных особенностей динамики развития пожара в начальной стадии.

Построение математической модели

Существует несколько основных моделей пожара используемых для прогнозирования процессов горения при пожарах [7]: интегральная модель; зонная модель и дифференциальная (полевая) модель.

Интегральная модель пожара позволяет получить информацию о средних значениях параметров среды в помещении для любого момента развития пожара. Зонная модель позволяет получить представление о размерах характерных зон, возникающих при пожаре в помещении, а также о средних параметрах состояния среды внутри этих зон. И наконец, полевая дифференциальная модель позволяет рассчитать для любого момента развития пожара значение всех локальных параметров состояния в любой точке пространства помещения. Рассматриваемые модели в математическом представлении характеризуются различными уровнями сложности. Наименее сложной и более простой по реализации является интегральная модель, но она обладает наименьшей точностью. Наиболее перспективной, с точки зрения, практического применения является полевая модель горения, основанная на системе дифференциальных уравнений в частных производных [1]. В результате решения данной системы уравнений получены поля распределения температур, скоростей, концентраций компонентов газовой среды в каждый момент времени [4].

Предлагаемая программа FDS (Fire Dynamics Simulator) [5] реализует вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении. FDS решает уравнения Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков [7]. Базовый алгоритм схемы данного уравнения для обеспечения достаточной точности по координатам и времени основывается на аппроксимации методом Эйлера с пересчетом, что представляет собой разновидность методов Рунге-Кутты. Турбулентность описывается алгебраической моделью, в которой динамический коэффициент турбулентной вязкости тепломассопереноса при горении определяется из уравнения

$$\mu = \rho \left(1 - e^{-\left(y^+/25\right)^2} \right) (C_s h)^2 \sqrt{\frac{1}{2} G}, \quad (1)$$

где величина G определяется выражением, параметр h по выражению $h = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – размеры данной ячейки вдоль осей декартовой системы координат, C_s – модельный параметр, имеющий значение по умолчанию = 0,17.

Так как основной интерес представляет начальный момент возгорания, при котором должна срабатывать автоматическая система пожарной сигнализации приводит к своевременному выполнению системой своих целевых функций (эвакуация людей, эффективное пожаротушение). Это время относительно мало, и некоторые особенности пожара этого промежутка времени позволяют значительно упростить математическую модель. Главной особенностью этого процесса является отсутствие газообмена помещения с окружающей средой [7]. То есть, приток воздуха в помещение из окружающей среды отсутствует, и динамика начала горения определяется исключительно пожарной нагрузкой. Поэтому полевая модель пожара, использование которой предлагается, имеет ограничение по времени и действует исключительно в начальный момент возгорания, то есть пока нет притока воздуха в помещение, и выполняются ограничивающее условие [2]

$$\frac{F_{np} \sqrt{gH}}{V} \tau \leq 5, \quad (2)$$

где F_{np} – суммарная площадь открытых проемов, м², g – ускорение свободного падения, м·с⁻², H – высота проемов в помещении, м, V – объем помещения, м³.

При работе в программе FDS используется схема одноступенчатой химической реакции, при которой результаты передаются через двухпараметрическую модель доли в смеси, то есть определяются два основных параметра смеси: массовая доля несгоревшего и массовая доля выгоревшего вещества (т.е. продуктов сгорания). При этом, лучистый теплообмен учитывается в модели путем решения уравнения переноса излучения для серого газа и, для некоторых ограниченных случаев, с использованием широкого диапазона моделирования. Уравнение решается «методом конечных объемов» (FVM) [5], который аналогичен методу конечных объемов для конвективного переноса. Считается, что на всех твердых поверхностях заданы тепловые граничные условия и известны характеристики горючести материала. Тогда, тепло- и массоперенос с поверхности и обратно рассчитывается с помощью эмпирических соотношений, хотя применение прямого численного моделирования (DNS) [5] позволяет вычислить передачу тепла и массы напрямую.

Таким образом, основные уравнения реализуемой математической модели [3], можно представить в общем виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} p = \dot{m}_b^m; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{u} p) + \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{u} p + \nabla \cdot p \mathbf{u} = p g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(p h_s) + \nabla \cdot p \mathbf{u} h_s = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}^m - \dot{q}_b^m - \nabla \cdot \dot{q}^n + \varepsilon; \quad (5)$$

$$p = \frac{\rho R T}{W}, \quad (6)$$

где p - плотность, $\mathbf{u} = [u; v; w]^T$ - три компонента скорости капле (частиц),

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$, $\dot{m}_b^m$ - скорость образования испаряющихся капле (частиц), g - ускорение свободного падения, f_b - параметр учитывающий внешние силы, воздействующие на капли (частицы),

$\tau_{i,j} = \mu \left(2S_{i,j} - \frac{2}{3} \delta_{i,j} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right)$, $\delta_{i,j} = \begin{cases} 1, i=j \\ 0, i \neq j \end{cases}$,

$$S_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3, \quad h_s = \sum_a Y_a h_{s,a}$$

$$h_{s,a}(\mathbf{T}) = \int_{T_0}^T c_{p,a}(\mathbf{T}') d\mathbf{T}' \quad \dot{q}^m$$

энтальпия, скорость тепловыделения в единичном объеме химической реакции, $\dot{q}_b^m$ - энергия передаваемая от испаряющихся капле (частиц).

Экспериментальная проверка разработанных моделей и алгоритмов была оценена по результатам компьютерного моделирования пожара тестового очага горения ТП-6 [6,9], для которого принята начальная стадия горения твердотопливного заряда находящегося в одноэтажном помещении склада-арсенала (рис. 1а): При времени моделирования 600 с и начальной температуре 20°C выполнена оценка по задымленности после начала пожара через 100 с (рис. 1б) и температуре через 100 с (рис. 1в) и 300 с (рис. 1г) соответственно.

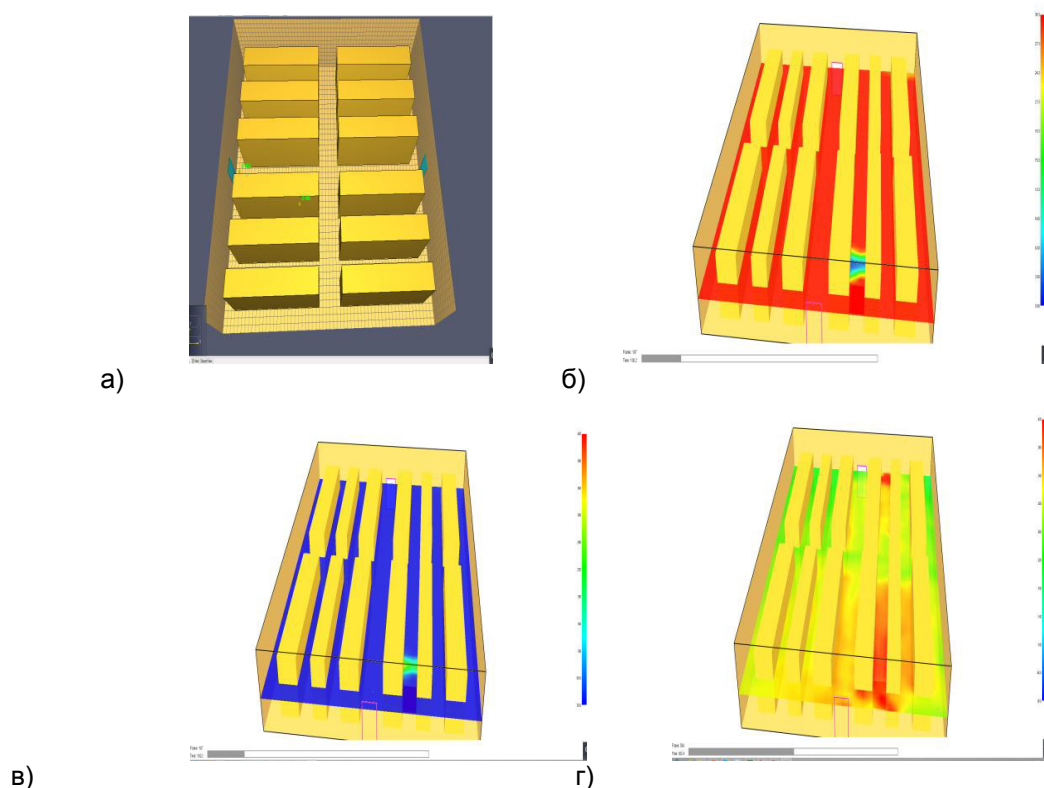


Рис. 1. Компьютерное моделирование объекта хранения: расчетная модель (а) задымленность через 100 с (б), температура через 100 с (в) и 300 с (г) в помещении на уровне +1,7 м

Развитие опасных факторов пожара во времени представлено на графиках (рис. 2-4). Как видно из графиков, потеря видимости,

вследствие задымления, первый импульс которого происходит через 2 минуты после начала пожара.

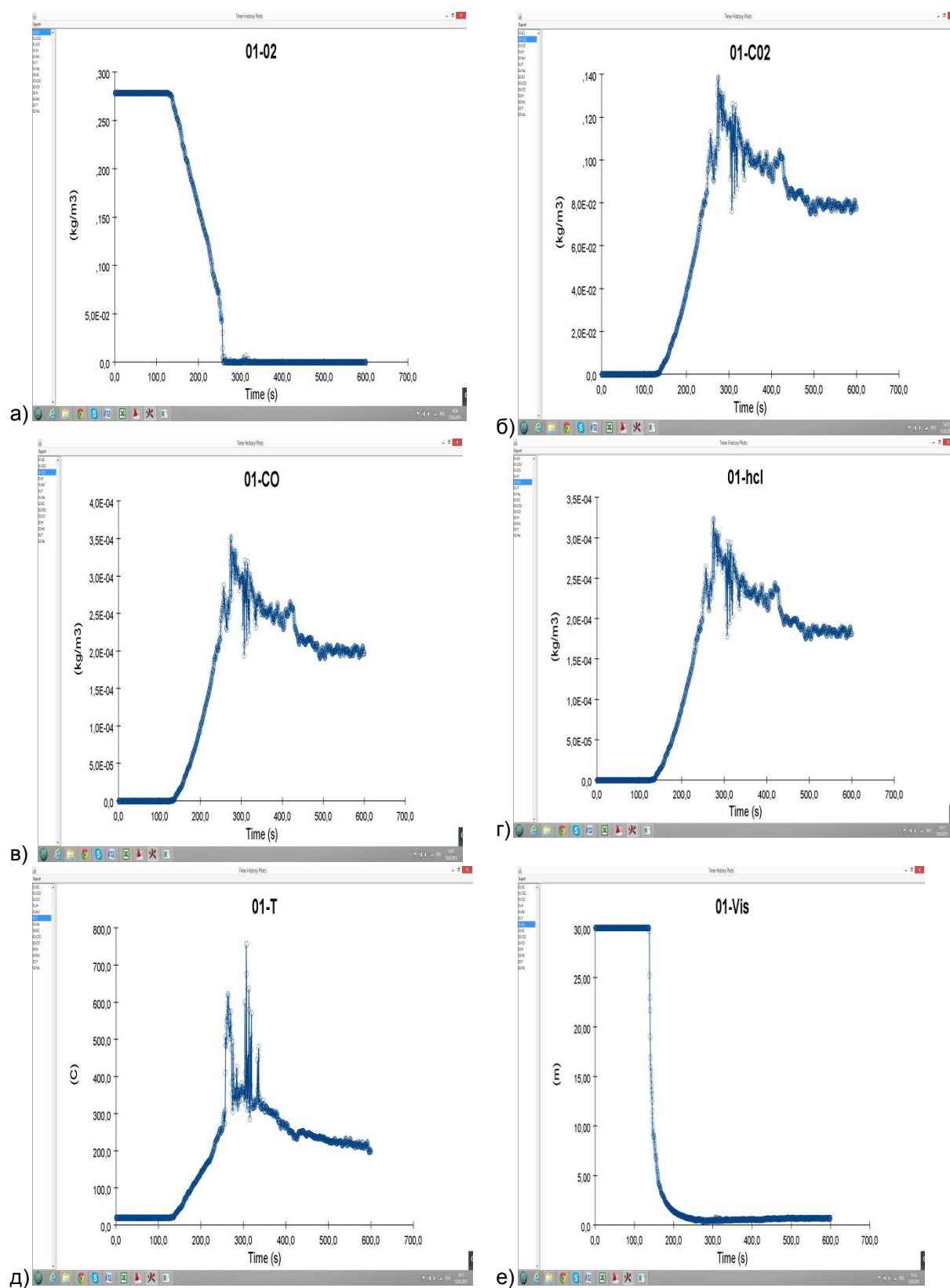


Рис. 2. Графики изменения содержания в помещении опасных факторов пожара на высоте +1,7 м:
 а – кислорода; б – углекислого газа; в – углерода; г – хлористого водорода;
 д – повышение температуры и е – потеря видимости

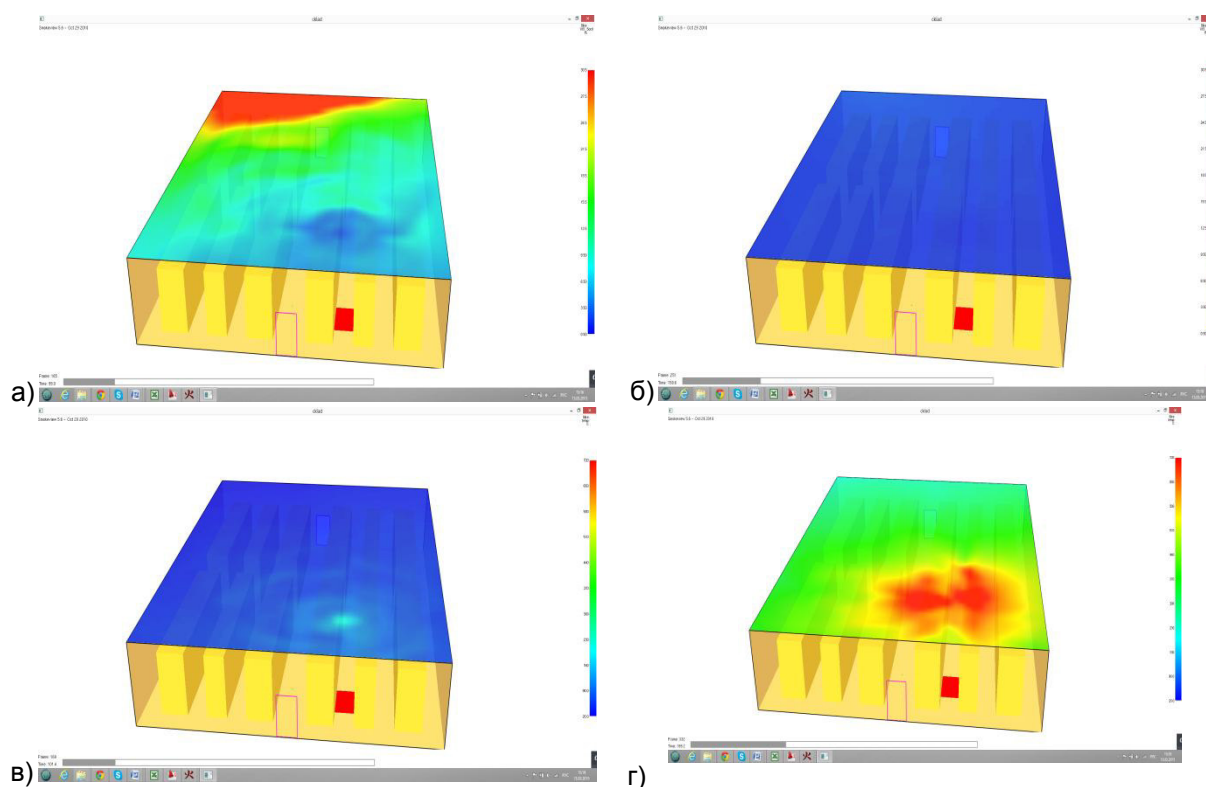


Рис. 3. Компьютерное моделирование для принятой модели задымленности через 100 с (а) и 150 с (б), температуры через 100 с (в) и 150 с (г) в помещении на уровне +4 м

Заключение

Из представленных расчетов можно отметить неоднородности распределения полей опасных факторов пожара в помещении пожара. Определить первый опасный фактор, по которому наступают критические значения для срабатывания автоматических систем противопожарной защиты. По расчетным значениям выбираем наиболее эффективную систему пожарной безопасности объекта.

Результаты математического моделирования динамики опасных факторов пожара, описанные в данной статье, с приемлемой точностью соотносятся с экспериментальными данными [10,11], что позволяет говорить об адекватности рассматриваемой математической модели в рамках описанных ограничений.

В работе для комплектования сложной структуры системы пожарной безопасности

объекта предложен алгоритм последовательно-одиночного размещения (рис.5), разработанной методики автоматизированного комплектования системы пожарной безопасности объекта [2], реализованного с использованием пакета прикладных программ.

По разработанным методикам была проведена оценка значений основных характеристик. Результаты показали хорошее совпадение экспериментальных и теоретических исследований, расхождение по параметрам составило 25...30%.

Таким образом, отмечается, что выявленные свойства системы позволяют рассчитывать основные характеристики по обычным выражениям теории горения, линеаризация которых составляет основу, предложенной в работе инженерной методики.

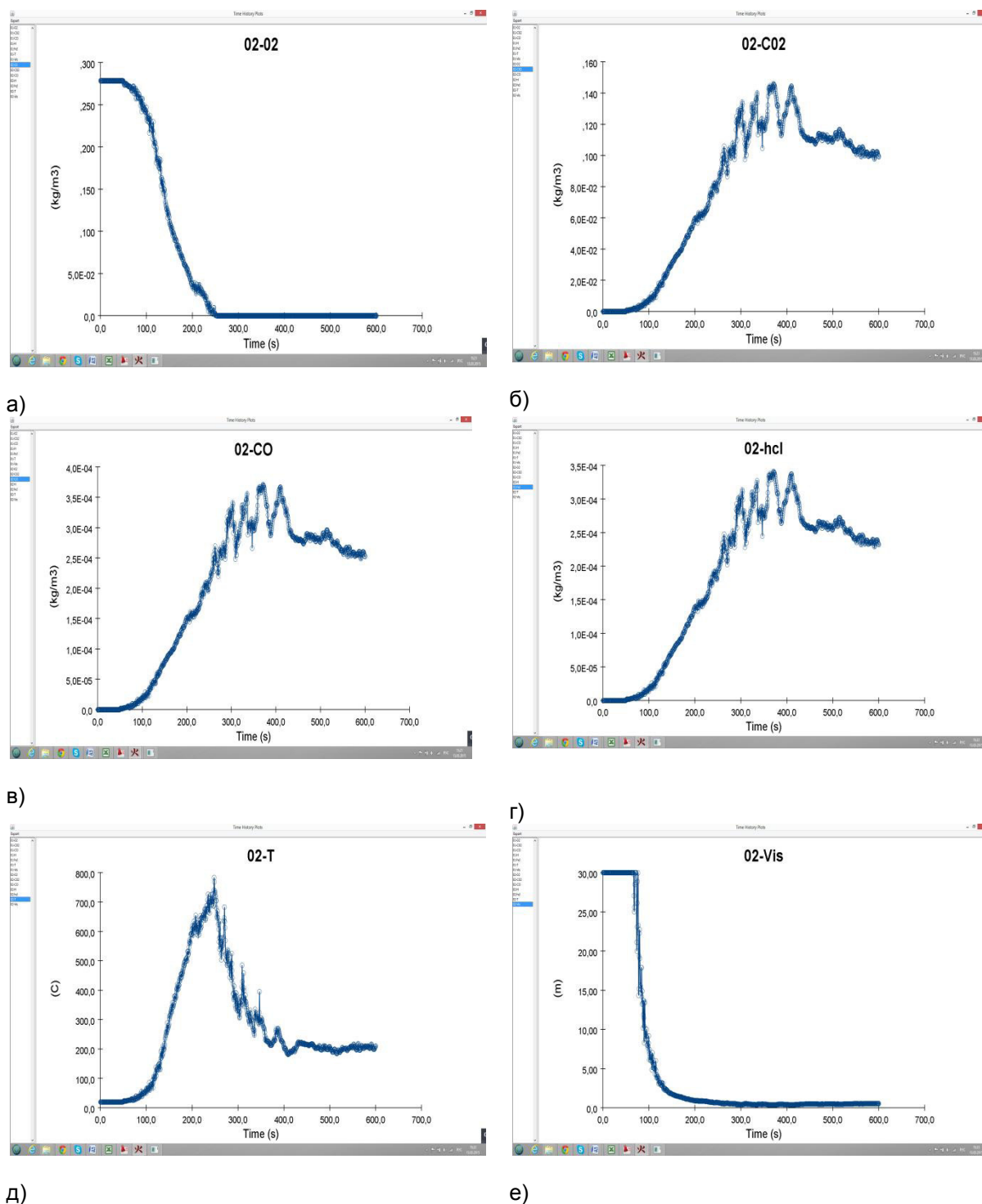


Рис. 4. Графики изменения содержания в помещении опасных факторов пожара на высоте +4 м:
 а – кислорода; б – углекислого газа; в – углерода; г – хлористого водорода;
 д – повышение температуры и е – потеря видимости

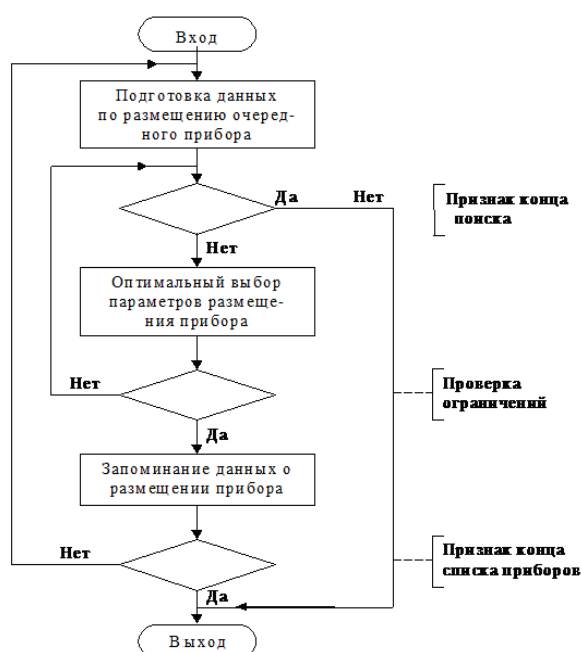


Рис. 5. Блок-схема алгоритма последовательно-одиночного размещения

Библиографический список

1. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – 336 с.
2. Ахтулов, А.Л. Особенности построения при автоматизации проектирования систем пожаротушения на распределенных объектах / А.Л. Ахтулов, Л.Н. Ахтулова, Л.А. Иванова, А.Е. Любаков // Омский научный вестник. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – № 3 (119). – С. 58-62
3. Ахтулов, А.Л. Особенности формирования систем предупреждения пожара на ранней стадии при создании экологической безопасности распределенного объекта [Текст] / А.Л. Ахтулов, Л.Н. Ахтулова, Л.А. Иванова, А.Е. Любаков // Омский ИжГТУ. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2015. – № 3 (67). – С.
4. Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – 482 с.
5. Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. National Institute of Standards and Technology. U.S. Department of Commerce. October 29, 2010. [Электронный ресурс] - адрес доступа: http://service.rintd.ru/sites/default/files/docs/FDS_Technical_Reference_Guide.pdf (Дата обращения 25.08.2015 года)
6. ГОСТ Р 53325-2009. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования. Методы испытаний [Электронный ресурс]. – М.: Стандартинформ, 2009. – 84 с. – адрес доступа: http://www.infosait.ru/Pages_gost/48119.htm (Дата обращения 25.08.2015 года)

http://www.infosait.ru/Pages_gost/48119.htm (Дата обращения 25.08.2015 года)

7. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

8. Иванова, Л.А. Влияние ракетного топлива на организм человека на объектах его использования, хранения и утилизации [Текст] / Л.А. Иванова // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! – 2015. – С.

9. ГОСТ 27331-87 (СТ СЭВ 5637-86). Пожарная техника. Классификация пожаров [Электронный ресурс]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 6 с. – адрес доступа: http://snipov.net/c_4702_snip_99029.html (Дата обращения 25.08.2015 года)

10. Шаровар, Ф.И. Принципы построения устройств и систем автоматической пожарной сигнализации / Ф.И. Шаровар. – М.: Стройиздат, 1983. – 355 с.

11. Синилов, В.Г. Системы охранной, пожарной и охранно-пожарной сигнализации / В.Г. Синилов. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 512 с.

MATHEMATICAL MODELING OF THE INITIAL STAGE OF A FIRE IN THE STORAGE OF MILITARY EQUIPMENT AND WEAPONS

A. L. Akhtulov, L. N. Akhtulova,
A. E. Lyubakov, L. A. Ivanova

Abstract. The article dwells on the basic models of a fire, allow to evaluate the influence of dangerous factors of fire: an integral model; differential (field) model. There was suggested an algorithm of a sequential and single occupancy for completing complex structure of an object's fire fighting system. There are presented the calculation of development of a fire's hazards in time during burning of propellant charge, the assessment of basic characteristics' values. The results have showed good agreement between the experimental and theoretical studies.

Keywords: weapons and military equipment, propellant charge, burning, mathematical model of a fire, hazards, initial stage.

References

1. Puzach S.V. *Metody rascheta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshenii i ih primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezopasnosti* [Methods of calculating heatmass exchange at the fire in a room and their application for solution of practical problems of fire and explosion safety]. Moscow, Akademija GPS MChS Rossii, 2003. 336 p.
2. Ahtulov A.L., Ahtulova L.N., Ivanova L.A., Lyubakov A.E. *Osobennosti postroeniya pri avtomatizacii proektirovaniya sistem pozharotusheniya na raspredelennyh objektah* [Features of building computer-aided engineering systems of fire-fighting on distributed objects]. *Omskij*

nauchnyj vestnik, Omsk Izdatelstvo OmGTU 2013 no. 119 pp. 58-62

3. Ahtulov A.L., Ahtulova L.N., Ivanova L.A., Lyubakov A.E. Osobennosti formirovaniya sistem preduprezhdeniya pozhara na rannej stadii pri sozdanii ehkologicheskoy bezopasnosti raspredelennogo obekta [Features of forming fire prevention systems on the initial stage when creating ecological safety of a distributed object]. *Vestnik IzhGTU Izhevsk*, Izdatelstvo IzhGTU 2015 no. 67

4. *Modelirovanie pozharov i vzryvov* [Modeling of fires and explosions]. Pod obshh. red. N.N. Brushlinskogo i A.Ja. Korol'chenko. Moscow, Pozhnauka, 2000. 482 p.

5. Fire Dynamics Simulator Version 5 Technical Reference Guide Volume 1 Mathematical Model National Institute of Standards and Technology U S Department of Commerce October 29 2010

6. State standart R 53325 2009 Tekhnika pozharnaya. Tekhnicheskie sredstva pozharnoj avtomatiki. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy. [Fire engineering. Technical means of fire automatics. General technical requirements. Test methods.]

7. Koshmarov Y.A. Prognozirovanie opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii [Prediction of fire hazards in a room] Moscow, Akademiya GPS MVD Rossii 2000 118 p.

8. Ivanova L.A. Vliyaniye raketnogo topliva na organism sheloveka na ob'ekтах ego ispol'zovaniya, hraneniya i utilizatsii [The impact of the rocket fuel on a human body on objects of its use, storage and disposal]. *Rossiya molodaiya: peredoviye tekhnologii – v promishlennost!* 2015 p.

9. State standart 27331-87 (ST CEV 5637-86). Pozharnaya tekhnika. Klassifikatsiya pogarov [Fire fighting equipment. Classification of fires]

10. Sharovar F.I. *Principy postroyeniya ustroystv i sistem avtomaticheskoy pozharnoy signalizatsii* [Principles of building automatic fire alarm systems and devices]. Moscow, Strojizdat, 1983. 355 p.

11. Sinilov V.G. *Sistemy ohrannoj, pozharnoj i ohranno-pozharnoj signalizatsii* [Security and fire alarm systems]. Moscow, Izdatel'skij centr «Akademija», 2010. 512 p.

Ахтулов Алексей Леонидович (Россия, Омск) – доктор технических наук, профессор, действительный член Международной академии авторов научных открытий и изобретений и Академии проблем качества, Почетный работник высшего профессионального образования, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВПО «ОмГУПС»

(644046, г. Омск, ул. Карла Маркса, 35; e-mail: ahtulov-al1949@yandex.ru).

Ахтулова Людмила Николаевна (Россия, Омск) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством» ФГБОУ ВПО «ОмГУПС» (644046, г. Омск, ул. Карла Маркса, 35; e-mail: ahtulova.ludm@yandex.ru).

Иванова Людмила Алексеевна (Россия, Омск) – кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВПО «ОмГТУ» (644050, Омск, ул. Мира, 11, e-mail: ahtulova.ludm@yandex.ru).

Любаков Александр Евгеньевич (Россия, Омск) – аспирант, начальник Учебно-тренировочного комплекса ФГБОУ ДПО «Омский учебный центр федеральной противопожарной службы» (644047, Омск, ул. 5 Армии, 135 к.1, e-mail: ubakov@mail.ru).

Akhtulov Alexey Leonidovich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor, a member of the International Academy of authors of scientific discoveries and inventions and the Academy of quality problems, Honorary worker of higher professional education, Professor of the department "Cars and rolling stock" of OSTU (644046, Omsk, Karl Marx St., 35, e-mail: ahtulov-al1949@yandex.ru).

Akhtulova Lyudmila Nikolaevna (Russian Federation, Omsk) – candidate of technical sciences, associate professor of the department "Economics of transport, logistics and quality management" of OSTU (644046, Omsk, Karl Marx St., 35 e-mail: ahtulova.ludm@yandex.ru).

Ivanova Lyudmila Alekseevna (Russian Federation, Omsk) – candidate of medical sciences, associate professor of the department "Health and safety" of The Omsk State Technical University (OmSTU) (644050, Omsk, Mira St., 11, e-mail: ahtulova.ludm@yandex.ru).

Lubakov Alexander Evgenievich (Russian Federation, Omsk) – graduate student, head of the Educational-training complex of Omsk training center of the federal fire-fighting service" (644047, Omsk, 5 Armii St., 135 k.1, e-mail: lubakov@mail.ru).