

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 1. С. 57–68
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(1):57-68

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ/REVIEW PAPER

УДК 336:763.336.275.2

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.01.57-68>

Моделирование в области обеспечения пожарной безопасности (обзор)

Николай Николаевич Брушлинский¹, Сергей Викторович Соколов¹✉,
Маргарита Петровна Григорьева¹, Петер Вагнер²

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

² Пожарная академия города Берлина, г. Берлин, Германия

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день в области обеспечения пожарной безопасности существует множество (более 150) различных математических моделей, которые призваны решать задачи теплотехники, тепло-массопереноса, движения людских потоков, динамики пожара в помещении и на открытых пространствах, а также определения параметров функционирования противопожарной службы. Системное исследование моделей в области пожарной безопасности было начато в 1970-е гг. и продолжается по сей день. В данной статье представлены результаты научного обобщения математических методов в области обеспечения пожарной безопасности и даны краткие исторические предпосылки их создания.

Цели и задачи. Научное обобщение основных математических моделей, применяемых для решения научно-технических задач в области обеспечения пожарной безопасности.

Методы. Методы системного анализа.

Результаты. В статье представлены результаты обзора разнообразных математических моделей в области обеспечения пожарной безопасности. Исследование охватило множество теорий в сфере пожарной безопасности (теории пожарной безопасности веществ и материалов, технологий, зданий и сооружений, огнестойкости строительных конструкций и зданий, профилактики пожаров, организации, функционирования и управления противопожарной службой и многое другое). Рассмотрены основные прикладные математические методы (аналитические, вероятностные, имитационные), содержащиеся в описанных теориях пожарной безопасности.

Обсуждение. В статье перечислены более 150 моделей пожаров разных типов и классов. В большинстве из них описываются процессы тепломассопереноса при пожарах, динамика пожаров, поведение веществ, материалов, строительных конструкций и прочее в условиях пожара. Также в исследовании уделено внимание вероятностным моделям теории функционирования экстренных и аварийно-спасательных служб.

Выводы. В настоящее время происходит формирование общей теории обеспечения пожарной безопасности, представляющей собой совокупность физико-химических, математических, экономико-математических и иных моделей возникновения, развития и ликвидации пожаров в зданиях и вне их в условиях применения пассивных и активных средств борьбы с ними.

Ключевые слова: математическая модель; методы системного анализа; вероятностный метод; имитационный метод; функционирование экстренных служб; пожарная опасность

Для цитирования: Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П., Вагнер П. Моделирование в области обеспечения пожарной безопасности (обзор) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 57–68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.57-68.

✉ Соколов Сергей Викторович, e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

Modeling in the field of fire safety (review)

Nikolay N. Bruslinskiy¹, Sergey V. Sokolov¹✉, Margarita P. Grigorieva¹, Peter Wagner²

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² Fire Academy of Berlin, Berlin, Germany

ABSTRACT

Introduction. To date, there are many (over 150) different mathematical models developed in the field of fire safety. These models are designed to (1) solve problems of heat engineering, heat and mass transfer, human

flows, indoor and outdoor fire behaviour, and (2) determine parameters of operation of fire service departments. System research into fire safety models was initiated in the 1970s, and it has been conducted since then. This article presents the results of scientific generalization of mathematical methods of fire safety and provides a brief historical background of the issue.

Targets and goals. Scientific generalization of basic mathematical models used to solve research and engineering problems of fire safety.

Methods. Methods of systems analysis.

Results. The article presents the results of a review of various mathematical models of fire safety. The study encompasses many theories (theories of fire safety of substances and materials, technologies, buildings and structures, fire resistance of building structures and buildings, fire prevention, organization, operation and management of fire service departments, etc.). Principal mathematical methods (analytical and probabilistic ones, as well as simulation), employed by the above theories of fire safety, are considered.

Discussion. The authors list more than 150 fire models of different types and classes. Most of them deal with processes of heat and mass transfer during fires, the fire behaviour, the behavior of substances, materials, building structures, etc. on fire. The study also focuses on probabilistic models of the theory of emergency rescue services operation.

Conclusions. Currently, a general theory of fire safety is being developed. It is a combination of physicochemical, mathematical, economic-mathematical and other models describing the break-out, development and elimination of fires inside and outside of buildings in case of application of passive and active fire-fighting appliances.

Keywords: mathematical model; methods of systems analysis; probabilistic method; simulation method; emergency service activities; fire hazard

For citation: Bruslinskiy N.N., Sokolov S.V., Grigorieva M.P., Wagner P. Modeling in the field of fire safety (review). *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):57-68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.57-68 (rus).

✉ Sergey Viktorovich Sokolov, e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

Возникновение пожарной опасности на Земле

Все люди знают о существовании пожарной опасности, т.е. о возникновении неуправляемых процессов горения (пожаров), приносящих большой вред человеку, обществу, окружающей среде.

Но пока нет серьезных исследований, изучающих историю возникновения пожарной опасности на планете. Анализ этой проблемы предполагает последовательное выяснение вопросов возникновения на Земле процессов горения, появления человека, его овладения огнем и, следовательно, возникновения пожаров, т.е. пожарной опасности.

Для дальнейшего анализа проблемы необходимо помнить, что горение — сложный физико-химический процесс взаимодействия горючего вещества и окислителя, характеризующийся выделением большого количества тепла и света. Для возникновения горения и развития процесса горения необходимо горючее вещество, окислитель и источник воспламенения. Обычно в качестве окислителя в этом процессе участвует кислород.

Следовательно, нужно выяснить, когда на Земле возникло горючее вещество, кислород и источники воспламенения (см. рисунок).

Земля возникла 4,7 млрд лет тому назад. Атмосфера (ее газовая оболочка) формировалась вместе с планетой и сначала состояла из углекислого газа, водорода, сероводорода, аммиака и метана (в основном, за счет вулканической активности). Кислорода в атмосфере не было.

Жизнь на Земле возникла в мировом океане 3,7 млрд лет назад в виде простейших организмов, которые в кислороде не нуждались.

Первые атомы кислорода появились только 2,4 млрд лет назад. Он производился океаном и полностью поглощался породами морского дна.

Только 0,54 млрд лет назад возник свободный кислород и стал накапливаться в атмосфере, постепенно достигнув уровня в 21 %.

Примерно 0,4 млрд лет назад на Земле появилась растительность (не водоросли океана).

Следовательно, только 300–400 млн лет назад на Земле появилось горючее вещество, окислитель и источники зажигания (молнии, извержения вулканов, самовоспламенение), т.е. могли возникнуть процессы горения.

Примерно 1,5–2 млн лет назад появился *homo erectus* (человек прямоходящий), который научился использовать огонь. В результате раскопок археологов удалось установить, что примерно 1 млн лет назад *homo erectus* использовал огонь в своих пещерах для обогрева и приготовления пищи [1].

Примерно 300–350 тыс. лет назад появился *homo sapiens* (человек разумный), который уже добывал и полномасштабно использовал огонь в своих целях. Тогда и стали возникать пожары (см. определение выше) и возникла пожарная опасность.

Таким образом, процессы горения на Земле могли возникнуть 350–400 млн лет назад, а пожарная опасность (пожары) — примерно 300–350 тыс. лет назад.



Когда и как на Земле возникла пожарная опасность
When and how the fire danger emerged on the Earth

Понятие «пожар» как процесс неуправляемого горения, приносящего вред обществу и природе, возникло только после появления на Земле исторического человека.

Итак, с тех пор как человек научился использовать огонь для обогрева жилища, приготовления пищи, ремесленной деятельности и т.д., он стал осознавать не только пользу от использования огня, но и потенциальную опасность процесса горения, который мог приносить большой вред при неосторожном использовании.

Так возникла проблема борьбы с пожарной опасностью и обеспечения пожарной безопасности.

Научное обеспечение противодействия пожарной опасности

Искать средства защиты от пожарной опасности человечество стало сразу, как только начало страдать от пожаров.

Сначала проблема осмысливалась на эмпирическом уровне: создавался специальный очаг для огня; возникали противопожарные разрывы между деревянными зданиями; строили каменные дома; запасали воду для тушения пожаров; власти разрабатывали требования пожарной безопасности (Указ «О градском благочинии» царя Алексея Михайловича) и т.д.

Однако пытливые умы людей, склонных к размышлениям и научным исследованиям, уже в древнем мире начали думать, что такое горение, теплота, какова их физическая сущность.

В средние века возникли достаточно наивные теории флогистона, теплорода, более строгая механическая теория теплоты и прочее. Но все они, так или иначе, создавали основу для физико-химического понимания процессов горения, для создания основ теплофизики, для действительно научного понимания всех этих явлений. В это время появились понятия температуры, теплоемкости и другие. Но мир «благодаря» научно-техническому прогрессу становился все более пожароопасным. Появлялись новые пожароопасные материалы, технологии, сооружения.

В 1928 г. появилась теория цепных реакций (лауреат Нобелевской премии академик Н.Н. Семёнов), позволившая построить строгую теорию горения и взрыва на химико-физической основе. В это время начала формироваться специальная система наук о пожарной безопасности.

Необходимо было последовательно изучить и оценить пожарную опасность веществ, материалов, технологий, строительных конструкций, зданий, сооружений и научиться снижать риски ее проявления. Для этого нужно было разработать методы анализа пожарной опасности указанных объектов и средства обеспечения их пожарной без-

опасности (противопожарная пропитка, обмазка, повышение огнестойкости конструкций, объемно-планировочные решения, способствующие эвакуации людей, создание противопожарной сигнализации, противопожарной автоматики, пожарной техники и снаряжения и т.д.).

Так возникли и развивались теории пожарной безопасности веществ и материалов, технологий, зданий и сооружений, огнестойкости строительных конструкций и зданий, профилактики пожаров, экономики пожарной безопасности, пожарных рисков, организации, функционирования и управления противопожарной службой и многие другие.

Все эти теории основаны на физике, теплофизике, химии, химической физике, теоретической и строительной механике, сопротивлении материалов, гидравлике, психологии, экономике, математике и других современных научных дисциплинах.

Можно сказать, что в настоящее время происходит формирование общей теории обеспечения пожарной безопасности, представляющей собой совокупность физико-химических, математических, экономико-математических и иных моделей возникновения, развития и ликвидации пожаров в зданиях и вне их в условиях применения пассивных и активных средств борьбы с ними [2].

Моделирование пожаров

Чтобы реально оценить пожарные риски на том или ином объекте защиты и эффективно управлять ими для обеспечения пожарной безопасности объекта, необходимо с позиций современных научных представлений как можно глубже и детальнее познать закономерности возникновения, развития и ликвидации пожаров всех классов и типов. Именно для этого и нужны модели пожаров [3–8].

Начиная со второй половины XX в. все больше исследователей в разных странах (Россия, Швеция, Великобритания, США, Япония и др.) начали профессионально изучать пожары, их динамику, способы, методы и средства борьбы с ними, вопросы проектирования систем противопожарной защиты, организации и управления противопожарными службами и др.

Наука о пожаре, об обеспечении пожарной безопасности различных объектов, городов и территорий, заняла свое место среди других прикладных наук, носящих междисциплинарный характер. Сегодня трудно указать научную дисциплину, методы которой не использовались бы при решении проблем пожарной безопасности [2].

Чтобы проиллюстрировать это положение, дадим сначала словесное описание процесса возникновения и развития пожара в помещении. Это описание уже является простейшей моделью

пожара, которую называют вербальной (от латинского «verbalis» — словесный).

Предположим, что в каком-то помещении возник пожар. В помещении нарастает количество выделяющегося тепла, растет температура, появляются продукты горения (в частности, токсичные). Часть тепла рассеивается в окружающем пространстве. Другая часть аккумулируется горючими и негорючими материалами, находящимися в помещении. Из них состоят и строительные конструкции, и различные предметы, и оборудование.

Нагреваясь до определенной температуры, сгораемые конструкции, предметы и оборудование воспламеняются и горят, а несгораемые материалы и конструкции подвергаются термической деструкции, изменяют свойства, теряют механическую прочность и при определенных условиях разрушаются.

Пожар может распространиться в соседние помещения, охватить все здание, переброситься на соседние.

Чтобы минимизировать последствия пожара, необходимо как можно быстрее обнаружить его, принять меры к его ликвидации, обеспечить эвакуацию людей, животных, материальных и духовных ценностей [2].

Для того чтобы проанализировать все перечисленные явления и процессы, нужно использовать методы физики, химии, физической химии, химической физики, теплофизики, механики твердых тел, жидкостей и газов, сопротивления материалов, материаловедения, токсикологии, физиологии, психологии, социологии, экономики и, конечно, математики.

Только с помощью комплекса этих (и других) научных дисциплин можно изучить и описать все самые сложные явления и процессы, сопровождающие возникновение, развитие и ликвидацию пожара, т.е. смоделировать пожар, построить его модель [3].

Сущность всех модельных представлений о развитии пожаров в объектах различного назначения и разной природы заключается в том, чтобы знать в любой момент времени и в каждой точке данного объекта значения всех величин, характеризующих пожар (температуру, давление и концентрации газов и дыма, скорости газовых потоков и т.д.). Иными словами, нужно знать поля всех этих величин в любой момент времени. Эта информация необходима для решения вопросов о проектировании объектов, требуемой огнестойкости их конструкций, размещения и устройства различных датчиков, об устройстве автоматических систем пожаротушения, систем дымоудаления, о путях эвакуации людей, о дислокации пожарных подразделений и многих других, связанных

с предупреждением пожаров и эффективной борьбой с ними в тех или иных объектах.

При построении моделей развития пожара в здании важнейшим вопросом является точность метода расчета тепломассообмена при пожарах. Сложность разработки такого метода заключается в многофакторности и нелинейности проблемы. Реальный пожар как неуправляемое горение является сложным, недостаточно изученным, нестационарным, трехмерным теплофизическим процессом, сопровождающимся изменением химического состава и параметров газовой среды.

Турбулентный конвективный и лучистый тепломассообмен в очаге горения с химическими реакциями, теплообмен между горячими газами и ограждающими конструкциями помещения и прочее осложняются тепломассообменом с окружающей средой через проемы и вследствие работы систем механической приточно-вытяжной вентиляции и пожаротушения, что приводит к принципиальной неоднородности температурных, скоростных и концентрационных полей продуктов горения в объеме помещения.

О сложности решения этой проблемы говорит, в частности, тот факт, что математическое моделирование турбулентного тепломассообмена в сложных термогазодинамических условиях, наряду с другими задачами нелинейной физики, входит в список тридцати особо важных и интересных проблем физики, сформулированных Российской академией наук и предназначенных к решению в XXI в. [9].

Итак, необходимо прежде всего научиться математически описывать движение тепловых и газовых потоков в помещениях и сооружениях различного назначения в условиях пожара. Попытки создания математических моделей пожара в помещении начались в 1970-х гг. Для построения таких моделей пожара чаще всего используют уравнения Навье – Стокса, т.е. дифференциальные уравнения движения вязкой жидкости или газа, представляющие математическое выражение законов сохранения импульса и массы. Для исследования сжимаемых течений к этим уравнениям необходимо добавить уравнение состояния, связывающее между собой давление, плотность и температуру, и уравнение энергии [2].

Впервые эти уравнения вывел в 1822 г. французский ученый Анри Навье (несколько позже это сделал француз С.Д. Пуассон, затем англичанин Д.Г. Стокс). Однако до настоящего времени, спустя два столетия, строгий математический анализ разрешимости краевых задач гидроаэромеханики для уравнений Навье – Стокса сжимаемого газа отсутствует (имеются некоторые результаты в матема-

тической теории динамики вязкой несжимаемой жидкости). Эту проблему предстоит решить математикам XXI в. [9]. Существуют приближенные решения, основанные на упрощающих предположениях, которые во многих случаях удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Для решения некоторых классов задач динамики вязких жидкостей и газов были разработаны достаточно эффективные вычислительные алгоритмы, основанные на использовании разностных схем. Однако их широкое использование сдерживалось отсутствием соответствующей вычислительной техники, которая появилась только в 60–70-х гг. XX столетия.

Именно в это время и началось активное конструирование моделей пожара, сначала в двумерной, затем в трехмерной постановке. Эти модели основаны на упоминавшихся уже уравнениях механики сплошной среды, включающих в себя реологический закон Стокса, закон теплопроводности Фурье, законы диффузии, законы радиационного переноса в газовой среде и т.п. Однако эта модель пожара — система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих изменения во времени плотности, температуры и состава газовой среды в каждой точке пространства внутри исследуемого объекта, — достаточно громоздка и ее численное решение даже с помощью современных высокопроизводительных ЭВМ связано с большими трудностями (большое время вычислений для каждого варианта расчетов, принципиальная зависимость результатов от характеристик очага горения и выбранных вариантов развития пожара на объекте защиты). Существуют и другие проблемы, ограничивающие пока возможности практического использования дифференциальных (полевых) моделей (например, недостаточная изученность явления турбулентности, которую необходимо учитывать в этих моделях).

Тем не менее за последние десятилетия объединенными усилиями специалистов ряда стран (Великобритании, США, Японии и др.) созданы мощные вычислительные комплексы «Sofie», «Jasmine», «Phoenix» и др., которые позволяют реализовывать и исследовать разнообразные модели пожаров [10–12]. Но пока мы находимся в самом начале этого сложного и длительного процесса: создания адекватных математических полевых моделей пожара для различных объектов и их эффективного использования на практике.

Хотя полевые модели пожара в принципе позволяют получить наиболее полную и точную информацию об исследуемом процессе по сравнению с любыми другими математическими моделями пожара, однако не для всех прикладных

пожарно-технических задач необходима такая детальная информация. Поэтому во многих случаях на практике успешно используются и другие, более простые математические модели пожара, среди которых прежде всего нужно отметить так называемые интегральные модели [3–5].

Эти модели описывают изменение среднеобъемных параметров состояния газовой среды (плотности, давления, концентрации различных компонентов среды, температуры) во времени при пожаре в помещении.

Усреднение всех этих параметров теоретически осуществляется с помощью интегральной теоремы о среднем, на практике — упрощенным расчетным путем. Далее на основе закона сохранения массы и первого закона термодинамики составляются так называемые уравнения пожара: уравнение материального баланса, уравнение кислородного баланса, уравнение баланса продуктов горения, уравнение баланса инертного газа и уравнение энергии пожара. К этим уравнениям добавляется усредненное уравнение состояния среды, находящейся в помещении при пожаре, которое связывает среднеобъемную температуру со среднеобъемными давлением и плотностью. Наконец, задаются начальные условия, характеризующие значения среднеобъемных параметров состояния среды в помещении перед пожаром.

Совокупность всех этих соотношений (большая часть которых представляет собой обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка) обеспечивает математическое описание пожара в помещении на уровне усредненных термодинамических параметров состояния среды. Именно эти соотношения и называют интегральной моделью пожара в помещении. Они были получены в середине 1970-х гг.

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, описывающих развитие пожара в помещении, может быть получено (как это бывает практически всегда) только для некоторых частных случаев. В общем же случае эта система решается численными методами с помощью ЭВМ (например, методом Рунге – Кутты).

Во многих случаях при исследовании пожара в помещении целесообразно выделить в этом помещении несколько зон, для каждой из которых составить свою интегральную модель пожара. Совокупность таких моделей называют зонными моделями пожара в помещении [5, 13, 14].

Интегральная модель пожара используется, например, для исследования процессов нарастания опасных факторов пожара в помещениях и расчета критической продолжительности пожара.

До сих пор мы в самом общем виде рассматривали вопросы моделирования пожаров в помещении. При этом говорили только об аналитических детерминированных моделях, часто обращая внимание читателя на невозможность получения их точного решения и необходимость использования разнообразных численных методов современной вычислительной математики, требующих для их реализации современной вычислительной техники.

В действительности, как говорилось выше, все выглядит значительно сложнее даже для проблемы пожаров в зданиях, а ведь не меньшую сложность представляют для изучения и моделирования пожары вне зданий, например крупномасштабные пожары, пожары резервуаров, в шахтах, туннелях, газовых и нефтяных фонтанов, на транспорте, степные, лесные пожары и т.д. [3, 6, 15, 16].

На самом деле важнейшим параметром возможного пожара в помещении, характеризующим пожарную опасность данного объекта, является так называемая удельная тепловая мощность пожара в единицу времени. Ее оценка требует учета вида горючей нагрузки (ее физико-химических параметров, общего количества), строительных и архитектурных особенностей этого объекта, возможных условий и сценариев развития в нем пожара (степени разрушения остекленных проемов, ограждающих конструкций), от чего существенно зависит характер тепло- и массообмена при пожаре в данном помещении, а значит и его последствия, условия его ликвидации [3, 16–18].

Совершенно очевидно, что значительная часть перечисленных здесь факторов и параметров не может быть задана каким-то единственным набором числовых значений. Наоборот, здесь принципиально допустимо широкое варьирование этих значений и огромное количество возможных вариантов их сочетаний. К этому следует добавить вероятностные оценки надежности и эффективности автоматических систем пожарной сигнализации и пожаротушения, условий эвакуации людей из горящего здания, чтобы сделать вывод о том, что любой реальный пожар можно и нужно рассматривать как сложнейший случайный процесс (в теоретико-вероятностном смысле), характеризующийся многократной неопределенностью. В частности, по нашему мнению, теория огнестойкости дальнейшее существенное развитие получит именно на стохастической основе [2].

Следовательно, наряду с аналитическими детерминированными моделями пожаров разных типов и классов, необходимо развивать и аналитические вероятностные модели пожаров [3, 4].

Однако учитывая ограниченность возможностей любых аналитических моделей, обусловлен-

Статистика моделей пожаров

Fire Model Statistics

Уровень моделирования Modelling level	Объект моделирования Modelled entity	Страны-разработчики моделей Countries of models development	Ориентировочное число моделей Approximate number of models
1	1. Пожар в помещении (комнате) 2. Пожар в здании (несколько смежных комнат) 3. Пожары технологических объектов (с учетом их спецификации) 1. Fire in a room (room) 2. Fire in a building (several adjoining rooms) 3. Engineering facilities on fire(taking into account their specifications)	Великобритания, Россия, США, Швеция, Япония, Китай и др. UK, Russia, USA, Sweden, Japan, China, etc.	Около 100 About 100
2	Крупномасштабный (массовый) пожар в населенном пункте Large-scale (mass) fire in a settlement	Россия, США, Япония и др. Russia, USA, Japan, etc.	Не менее 5 At least, 5
3	Пожары в населенных пунктах и их ликвидация силами противопожарной службы (в основном, организационно-управленческие аспекты) Fires in the city and their elimination by fire-fighting brigades (mainly organizational and managerial aspects)	Россия, США, Великобритания, Япония и др. Russia, USA, UK, Japan, etc.	Около 10 About 10
4	Пожары на открытых пространствах (резервуары, лесобиржи и др.) Fires in open spaces (reservoirs, timber yards, etc.)	Россия, США, Япония и др. Russia, USA, Japan, etc.	Около 15 About 15
5	Лесные и другие растительные пожары Forest and other landscape fires	Австралия, Россия, Канада, США Australia, Russia, Canada, USA	Около 10 About 10
6	Подземные и подводные пожары (метрополитен, шахты, тоннели и др.) Underground and underwater fires (metro, mines, tunnels, etc.)	Россия, США, Германия и др. Russia, USA, Germany, etc.	Не менее 15 Not less than 15
7	Эвакуация людей и животных из горящих зданий [33–36] Evacuation of humans and animals from burning buildings [33–36]	Россия, Япония Russia, Japan	Не менее 10 Not less than 10

ную пока нынешним состоянием математической науки, выход нужно искать на пути создания все более мощных имитационных (компьютерных) моделей пожаров и связанных с ними процессов. Напомним, что имитационные модели представляют собой совокупность процедур и алгоритмов, описывающих моделируемый процесс и реализованных в виде программ для ЭВМ. Их широкому применению способствует быстрое развитие современной вычислительной математики и вычислительной техники [3, 19–24].

Моделирование процессов функционирования экстренных служб

Моделирование процесса функционирования экстренных служб (пожарная, полиция, скорая медицинская помощь и др.), начатое в России, Великобритании и США в середине 1960-х гг. на уровне построения аналитических моделей, ока-

залось малоэффективным из-за того, что эти модели описывали исследуемый процесс только во времени, хотя он носит принципиально пространственно-временной характер [21–24]. Поэтому для моделирования этого процесса пришлось создавать компьютерные имитационные модели (сначала элементарные [25–28], затем все более сложные [19, 21, 29, 30]), позволяющие учитывать практически неограниченное число параметров описываемого процесса.

В начале 1990-х гг. в России была создана компьютерная имитационная система (КИС) «КОСМАС» (Компьютерная Система Моделирования Аварийных Служб), получившая широкую известность в мире как информационная технология XXI в., которая с высокой степенью точности описывает реальные события, действия и процессы функционирования любых экстренных служб в городах и территориях. Данная КИС предназначена для исследования и экс-

пертизы деятельности экстренных служб, а также для проектирования их развития [19, 20]. Это была одна из первых в мире сложных специализированных КИС, которая нашла свое применение в более 45 городах и территориях разных стран мира для различных экстренных служб.

В мае 2005 г. Консультативный комитет по информационным технологиям при Президенте США представил Джорджу Бушу аналитический доклад под названием «Вычислительная наука: обеспечение конкурентоспособности Америки» [31]. Термин «вычислительная наука» появился в научно-технической литературе сравнительно недавно. Он обозначает быстро развивающуюся область научно-технического прогресса, связанную с созданием алгоритмов решения задач, имитационным моделированием различных явлений и процессов в науке и технике, а также с созданием программного обеспечения для целей имитационного моделирования [31].

В аналитическом докладе Президенту США достаточно убедительно показано, что развитие «вычислительной науки» создает уникальные возможности для проведения научных исследований, необходимых мировому сообществу XXI в. С использованием ее методов и средств ученые могут изучать самые разнообразные проблемы, исследование которых другими методами является неэффективным, а зачастую и просто невозможным. Диапазон этих проблем чрезвычайно широк

(от исследования Вселенной до биофизических процессов головного мозга, от крупномасштабных природных катаклизмов до распространения вирусов и анализа ядовитых веществ, используемых террористами, и многое, многое другое) [31].

Точно так же и наука о пожаре, ее дальнейшие успехи в борьбе с ним существенно зависят от ожидаемых в XXI в. достижений математики, физики, «вычислительной науки» и иных дисциплин.

Выводы

В заключение приведем таблицу, в которой перечислены известные модели в области обеспечения пожарной безопасности [32].

В этой таблице приведены более 150 моделей разных типов и классов. В большей части этих моделей описываются процессы тепломассопереноса при пожарах, динамика пожаров, поведение веществ, материалов, строительных конструкций, разнообразные модели поведения людей и животных в условиях пожара, их эвакуации, процессов функционирования подразделений противопожарной службы, подготовки кадров для нее и прочее.

Эти модели являются предметом и основой современной науки о пожарах. В результате создания и использования таких моделей появятся (и уже появляются) негорючие материалы, пожаробезопасные приборы, технологические процессы, здания, сооружения, новые средства и способы тушения пожаров и т.д.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Cohen J.* Human ancestors tamed fire earlier than thought. 2018. URL: <https://www.history.com/news/human-ancestors-tamed-fire-earlier-than-thought> (Accessed September 15, 2022).
2. *Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Вагнер П.* Человечество и пожары (краткий очерк). М. : ИПЦ Маска, 2007. 140 с.
3. Моделирование пожаров и взрывов / под ред. Н.Н. Брушлинского, А.Я. Корольченко. М. : Пожнаука, 2000. 482 с.
4. *Пузач С.В.* Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
5. *Молчадский И.С.* Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
6. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука, 1992. 408 с.
7. *Drysdale D.* An introduction to fire dynamics. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2002.
8. *Freedman R.* Survey of competer models for fire and smoke. Factory Mutual Research Corp. USA, 1991.
9. *Гинзбург В.Л.* Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 4. С. 420–441.
10. *Zhang T., Wang Z., Wong H.Y., Tam W.Ch., Huang X., Xiao F.* Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 130. P. 103579. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103579
11. *Nguyen H.T., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K.T.Q.* Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of facade fire tests // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 130. P. 103591. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103591
12. *Yakhou N., Thompson P., Siddiqui A., Abualdenien J., Ronchi E.* The integration of building information modelling and fire evacuation models //

- Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 63. P. 105557. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105557
13. Пузач С.В., Колодяжный С.А., Колосова Н.В. Модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в помещении, учитывающая форму конвективной колонки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 12. С. 33–39. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.33-39
 14. Пузач С.В., Мустафин В.М., Акперов Р.Г. Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 76–87. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.76-87
 15. Lafdal B., Djebbar R., Boulet P., Mehaddi R., Koutaib E.M., Beji T., Torero J.L. Numerical study of the combustion regimes in naturally-vented compartment fires // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 131. P. 103604. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103604
 16. Cao R.F., Lee E.W.M., Xie W., Gao D.L., Chen Q., Yuen A.C.Y. et al. Development of an agent-based indoor evacuation model for local fire risks analysis // Journal of Safety Science and Resilience. 2022. Vol. 4. Issue 1. Pp. 75–92. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2022.09.006
 17. Li Y., Ko Y., Lee W. RGB image-based hybrid model for automatic prediction of flashover in compartment // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 132. P. 103629. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103629
 18. Юдович В.И. Глобальная разрешимость против коллапса в динамике несжимаемой жидкости // Математические события XX века. М. : ФАЗИС, 2003. С. 519–548.
 19. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Вагнер П. и др. Безопасность городов: имитационное моделирование городских процессов и систем. М. : ФАЗИС, 2004. 172 с.
 20. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Основы теории организации, функционирования и управления экстренными и аварийно-спасательными службами : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. С. 92.
 21. Алехин Е.М., Брушлинский Н.Н., Коломиец Ю.И., Соколов С.В., Вагнер П. Проблемно-ориентированные имитационные системы для автоматизированного проектирования и стратегического управления экстренными и аварийно-спасательными службами городов // Вестник РАЕН. 2012. Т. 12. № 3. С. 27–34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23640414>
 22. Carter G.M., Ignall E.J. A simulation model of fire department operations: Design and preliminary results // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1970. Vol. 6. Issue 4. Pp. 282–293. DOI: 10.1109/TSSC.1970.300303
 23. Sauders P.B. A computer model for simulating the response activities of a fire department. NBS report 10488. 1971.
 24. Grace M. Carter. Simulation model of fire department operation. Program description. RB-242-400. USA, NY : The New York Rand Institute, 1974. 214 p.
 25. Брушлинский Н.Н., Гришин А.Ф., Соболев Н.Н. Об имитационном моделировании процесса функционирования пожарной охраны // Вопросы экономики в пожарной охране : сб. науч. тр. Вып. 6. М. : ВНИИПО, 1977. С. 51–55.
 26. Брушлинский Н.Н., Лысов Р.Н., Гришин А.Ф. Об одной имитационной модели процесса функционирования пожарной охраны // Вопросы экономики в пожарной охране. Вып. 7 : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1978. С. 10–14.
 27. Гаврилей В.М., Гришин А.Ф. Совершенствование системы противопожарной защиты города на основе методов имитационного моделирования // Экономика и управление в пожарной охране : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1983. С. 54–59.
 28. Сон Э.Г., Васильев Е.П., Конченков В.Н., Вилитенко А.Г. Имитационная модель функционирования пожарной охраны // Проблемы безопасности объектов народного хозяйства и административно-территориальных единиц : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1988. С. 66–74.
 29. Алехин Е.М., Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Компьютерные имитационные системы для деятельности экстренных служб города // Программные продукты и системы. 1994. № 4. С. 27–32.
 30. Alekhin E.M., Bruschkinsky N.N., Sokolov S.V., Wagner P. Russian simulation for strategic planning // Fire International. 1996. No. 11. Pp. 32–33.
 31. Колин К.К. Будущее информатики в XXI веке: российский ответ на американский вызов // Открытое образование. 2006. № 2. С. 73–77.
 32. Брушлинский Н.Н. Мировая пожарная статистика и ее роль в обеспечении пожарной безопасности на планете // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1997. Т. 6. № 4. С. 81–86.
 33. Самошин Д.А. Методологические основы нормирования безопасной эвакуации людей из зданий при пожаре : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2017. 357 с.
 34. Холщевников В.В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1983. 357 с.
 35. Babrauskas V. Analyzing ignition data for fire modeling purposes // Fire and Materials. 2021. Vol. 46. Issue 6. Pp. 896–904. DOI: 10.1002/fam.3037
 36. Mendez A., Farazmand M. Quantifying rare events in spotting: How far do wildfires spread? // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 132. P. 103630. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103630

REFERENCES

1. Cohen J. *Human ancestors tamed fire earlier than thought*. 2018. URL: <https://www.history.com/news/human-ancestors-tamed-fire-earlier-than-thought> (Accessed September 15, 2022).
2. Brushlinsky N.N., Sokolov S.V., Wagner P. *Humanity and Fires (short essay)*. Moscow, IPC Maska, 2007; 140. (rus).
3. *Simulation of fires and explosions*. Brushlinskogo N.N., Korolchenko A.Ya. (ed.). Moscow, Pozhnauka Publ., 2000; 482. (rus).
4. Puzach S.V. *Methods for calculating heat and mass transfer during a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii, 2005; 336. (rus).
5. Molchadskiy I.S. *Fire in the compartment*. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).
6. Grishin A.M. *Mathematical modeling of forest fires and new ways to fight them*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992; 408. (rus).
7. Drysdale D. *An introduction to fire dynamics*. 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons, 2002.
8. Freedman R. *Survey of competer models for fire and smoke*. Factory Mutual Research Corp. USA, 1991.
9. Ginzburg V.L. What problems of physics and astrophysics seem especially important and interesting now (thirty years later, and already on the threshold of the 21st century)? *Advances in the Physical Sciences*. 1999; 169(4):420-441. (rus).
10. Zhang T., Wang Z., Wong H.Y., Tam W.Ch., Huang X., Xiao F. Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning. *Fire Safety Journal*. 2022; 130:103579. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103579
11. Nguyen H.T., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K.T.Q. Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of facade fire tests. *Fire Safety Journal*. 2022; 130:103591. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103591
12. Yakhou N., Thompson P., Siddiqui A., Abualdenien J., Ronchi E. The integration of building information modelling and fire evacuation models. *Journal of Building Engineering*. 2021; 63:105557. DOI: 10.1016/j.job.2022.105557
13. Puzach S.V., Kolodyazhnyy S.A., Kolosova N.V. Modified zonal model for calculating of the fire gas dynamics in the room taking into account the form of convective column. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(12):33-39. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.33-39 (rus).
14. Puzach S.V., Mustafin V.M., Akperov R.G. A new approach to calculating the time to the blocking of the escape routes due to the loss of visibility in the smoke of an indoor fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):76-87. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.76-87 (rus).
15. Lafdal B., Djebbar R., Boulet P., Mehaddi R., Koutaib E.M., Beji T., Torero J.L. Numerical study of the combustion regimes in naturally-vented compartment fires. *Fire Safety Journal*. 2022; 131:103604. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103604
16. Cao R.F., Lee E.W.M., Xie W., Gao D.L., Chen Q., Yuen A.C.Y. et al. Development of an agent-based indoor evacuation model for local fire risks analysis. *Journal of Safety Science and Resilience*. 2022; 4(1):75-92. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2022.09.006
17. Li Y., Ko Y., Lee W. RGB image-based hybrid model for automatic prediction of flashover in compartment. *Fire Safety Journal*. 2022; 132:103629. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103629
18. Yudovich V.I. Global solvability versus collapse in incompressible fluid dynamics. *Mathematical events of the twentieth century*. Moscow, FAZIS Publ., 2003; 519-548. (rus).
19. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Vagner P., et al. *Security of cities: simulation of urban processes and systems*. Moscow, FAZIS Publ., 2004; 172. (rus).
20. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. *Fundamentals of the theory of organization, functioning and management of emergency and rescue services : monograph*. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii 2018; 92. (rus).
21. Alekhin E.M., Brushlinskiy N.N., Kolomiets Yu.I., Sokolov S.V., Vagner P. Task-oriented simulation systems for automating projection and strategic management of the city emergency services. *Herald of Education and Science Development of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2012; 12(3):27-34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23640414> (rus).
22. Carter G.M., Ignall E.J. A simulation model of fire department operations. Design and preliminary result. *IEEE Trans. System Sci. and Cybernetics*. 1970; 40:282-293.
23. Saunders P.B. *A computer model for simulating the response activities of a fire department*. NBS report 10488. 1971.
24. Carter G.M. *Simulation model of fire department operation. Program description. RB-242-400*. USA, NY : The New York Rand Institute, 1974; 214.
25. Brushlinskiy N.N., Grishin A.F., Sobolev N.N. On simulation modeling of the process of functioning of the fire department. *Economics in the fire department/Proceedings of VNIPO. Vol. 6*. Moscow, VNIPO, 1977; 51-55. (rus).
26. Brushlinskiy N.N., Lysov R.N., Grishin A.F. On one simulation model of the process of functioning of the fire department. *Economics and management in fire protection. Proceedings of VNIPO, Vol. 7*. Moscow, VNIPO, 1978; 10-14. (rus).
27. Gavrilov V.M., Grishin A.F. Improving the system of fire protection of the city based on simulation methods. *Economics and management in fire protection. Proceedings of VNIPO*. Moscow, VNIPO, 1983; 54-59. (rus).

28. Son E.G., Vasilyev E.P., Kopchenov V.N., Vilitenko A.G. Simulation model of the functioning of the fire department. *Problems of security of objects of the national economy and administrative-territorial units*. Moscow, VNIPO, 1988; 66-74. (rus).
29. Alekhin Ye.M., Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. *Computer simulation systems for the activities of emergency services of the city*. 1994; 4:27-32. (rus).
30. Alekhin E.M., Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Wagner P. Russian simulation for strategic planning. *Fire International*. 1996; 11:32-33.
31. Kolin K.K. The future of informatics in the 21st century: Russian response to the American challenge. "Open Education". *Open Education*. 2006; 2:73-77. (rus).
32. Brushlinskiy N.N. World fire statistics and its role in ensuring fire safety on the planet. *Pozharovzryvo-bezopasnost/Fire and explosion safety*. 1997; 6(4): 81-86. (rus).
33. Samoshin D.A. *Methodological basics of regulation of safe people evacuation from buildings in case of fire : Dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2017; 357. (rus).
34. Kholshchevnikov V.V. *Human flows in buildings, structures and on the territory of their complexes : Dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 1983; 357.
35. Babrauskas V. Analyzing ignition data for fire modeling purposes. *Fire and Materials*. 2021; 46(6): 896-904. DOI: 10.1002/fam.3037
36. Farazmand A.M.M. Quantifying rare events in spotting: How far do wildfires spread? *Fire Safety Journal*. 2022; 132:103630. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103630

Поступила 21.11.2022, после доработки 05.12.2022;

принята к публикации 16.12.2022

Received November 21, 2022; Received in revised form December 5, 2022;

Accepted December 16, 2022

Информация об авторах

БРУШЛИНСКИЙ Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры организации деятельности пожарной охраны (в составе учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности), Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 141792; ORCID: 0000-0003-0973-7095; e-mail: nbrus1934@yandex.ru

СОКОЛОВ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, профессор кафедры организации деятельности пожарной охраны (в составе учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности), Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 692884; ORCID: 0000-0002-2992-8510; e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

ГРИГОРЬЕВА Маргарита Петровна, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры организации деятельности пожарной охраны (в составе учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности), Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 772050; ORCID: 0000-0003-3634-7842; e-mail: margarita_theone@mail.ru

Information about the authors

Nikolay N. BRUSLINSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Scientific and Educational Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 141792; ORCID: 0000-0003-0973-7095; e-mail: nbrus1934@yandex.ru

Sergey V. SOKOLOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Scientific and Educational Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 692884; ORCID: 0000-0002-2992-8510, e-mail: albrus-ssv@yandex

Margarita P. GRIGORIEVA, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Scientific and Educational Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 772050; ORCID: 0000-0003-3634-7842; e-mail: margarita_theone@mail.ru

ВАГНЕР Петер, канд. техн. наук, заместитель начальника Пожарной Академии города Берлина, Германия, 13503, г. Берлин, Руппинер Шоссе, 268; ORCID: 0000-0002-9485-8766; Scopus Autor ID: 57201767243; e-mail: drpeterwagner@freenet.de

Вклад авторов:

Брушлинский Н.Н. — научное руководство; концепция исследования; написание исходного текста.

Соколов С.В. — концепция исследования; написание исходного текста; доработка текста; итоговые выводы.

Григорьева М.П. — поиск информации; доработка текста; итоговые выводы.

Вагнер П. — развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Peter WAGNER, Ph. D., Deputy Head of the Fire Academy of Berlin, Ruppiner Chaussee, 268, Berlin, 13503, Germany; ORCID: 0000-0002-9485-8766; Scopus Autor ID: 57201767243; e-mail: drpeterwagner@freenet.de

Contribution of the authors:

Nikolay N. Bruslinskiy — scientific management; research concept; methodology development; writing the draft; final conclusions.

Sergey V. Sokolov — research concept; writing the draft; final conclusions.

Margarita P. Grigorieva — follow-on revision of the text; final conclusions.

Peter Wagner — methodology development; writing the draft; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.