

## ОБЗОР МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА В ЗДАНИЯХ

Кандидат техн. наук *И.С. Свири*  
ЗАО «Нордавинд», Москва, Россия

*Освещена статистика борьбы с пожарами. Приведен обзор моделей пожара как коммерческих, так и свободного распространения в соответствии с классификацией Оленик и Карпенгер. Акцентируется внимание читателей на связку FDS+Smokeview+Evac, как на самую развитую открытую модель, и на модель CFAST, позволяющую выполнять моделирование с приемлемой точностью для многих задач, но при этом умеренно расходующую вычислительные ресурсы.*

**Ключевые слова:** пожары, объекты пожаров, методы борьбы с пожарами, математические модели распространения пожара, моделирование.

## REVIEW OF MODELS OF THE SPREAD OF FIRE IN BUILDINGS

Ph. D. (Tech) *I.S.Svirin*  
"Nordavind", CJSC, Moscow, Russia

*In the article it is represented statistics of firefighting. There has been done an overview of fire models both commercial and of free spread in accordance with Olenich and Carpenter's classification. Readers' attention is called to the line FDS+Smokeview+Evac as to the most advanced open model and to the model CFAST allowing to simulate with an acceptable accuracy for many objectives with at the same time reasonable spending computational resources.*

**Key words:** fire, objects of fire, firefighting techniques, mathematical models for predicting fire spread, modeling.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема борьбы с пожарами стоит остро для всего мирового сообщества. Статистические данные за 2011 год, предоставленные МЧС России и National Fire Protection Association (США) (см. табл. 1 и 2), говорят о больших материальных и человеческих потерях, вызванных пожарами.

Таблица 1

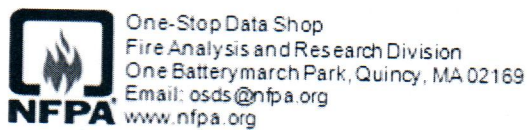
Статистика по пожарам за 2011 год в России по данным МЧС [1]

Наименование показателя	Всего
Количество пожаров, единиц	168528
Прямой материальный ущерб от пожаров, тыс. руб	17280086
Погибло при пожарах, человек	12028
Травмировано при пожарах, человек	12457

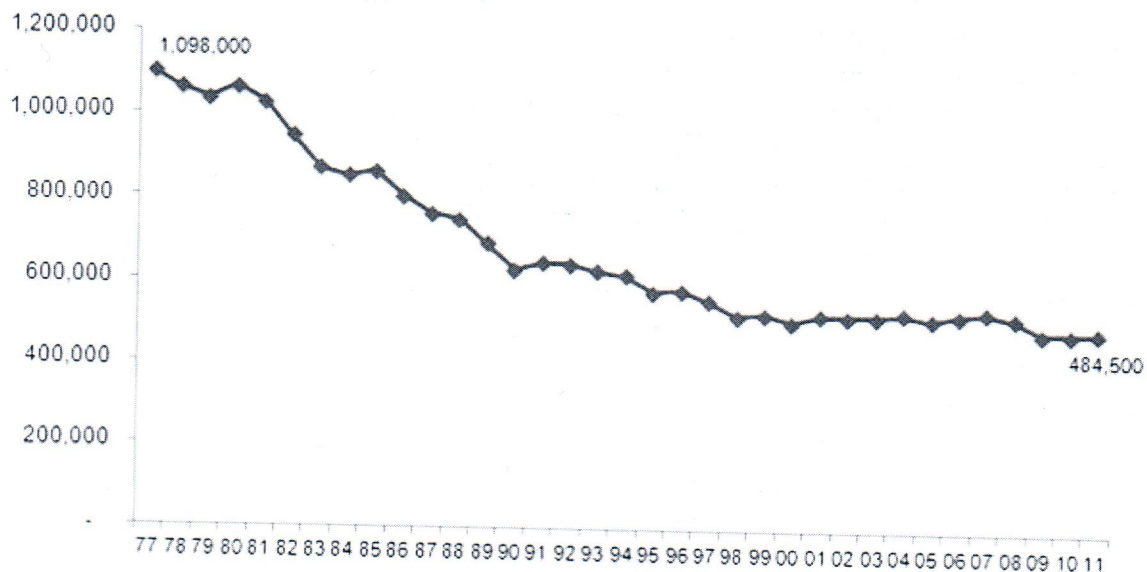
Статистика по пожарам за 2011 год в США по данным National Fire Protection Association [2]

Наименование показателя	Всего
Количество пожаров в зданиях, единиц	484500
Прямой материальный ущерб от пожаров в зданиях, млрд. долл.	9,7
Погибло при пожарах, человек	3005
Травмировано при пожарах, человек	17500

С 1977 года количество пожаров и вследствие их смертей в США сократилось на 56% и 59% соответственно по данным National Fire Protection Association (см. графики на рис. 1, 2 и 3). Несмотря на достигнутый прогресс в борьбе с пожарами, их количество остается существенным, что вызывает необходимость совершенствования средств противопожарной безопасности.



U.S. Structure Fire Problem by Year 1977-2011



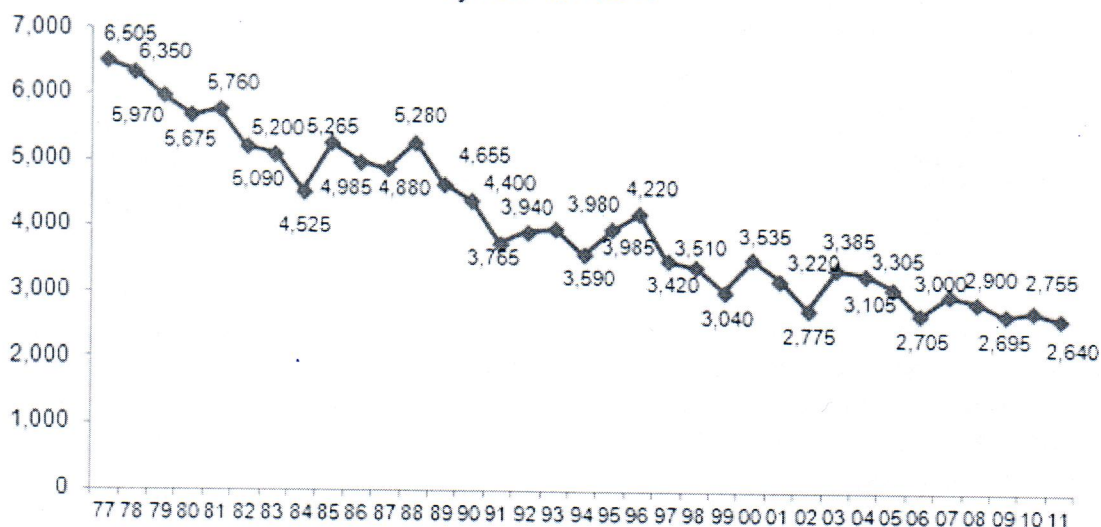
Source: *Fire Loss in the United States during 2011*, Michael J. Karter, Jr. NFPA, September 2012 a previous reports in the series.

Рис. 1. Количество пожаров в зданиях в 1977-2011 годах в США по данным National Fire Protection Association



One-Stop Data Shop  
 Fire Analysis and Research Division  
 One Batterymarch Park, Quincy, MA 02169  
 Email: osds@nfpa.org  
 www.nfpa.org

Civilian Structure Fire Deaths  
 by Year 1977-2011



Source: *Fire Loss in the United States during 2011*, Michael J. Karter, Jr. NFPA, August 2012 a previous reports in the series.

Рис. 2: Количество смертей вследствие пожаров в зданиях в 1977-2011 годах в США по данным National Fire Protection Association

По данным МЧС России (см. табл. 3) 78% пожаров происходят в зданиях. В данной статье будут рассматриваться модели пожара этого типа.

Основными методами борьбы с пожарами в зданиях являются:

- Пассивные методы защиты. Устойчивые к воздействию огня конструктивные элементы зданий, препятствующие распространению огня и дыма.
- Активные методы защиты. Средства автоматического и ручного детектирования признаков возгорания и пожаротушения (пожарные сигнализации, спринклеры и др. системы пожаротушения).
- Подготовка персонала и пользователей зданий к действиям в чрезвычайных ситуациях, связанных с возникновением пожара. Обучение правилам использования пассивных и активных методов защиты от пожаров, разработка плана эвакуации.

Использование математических моделей распространения пожара и дыма, работы противопожарного оборудования, воздействия пожара на здание, поведения людей в горящем здании позволяет повысить качество:

- проектирования здания с целью повышения устойчивости к пожару, улучшения возможностей эвакуации при пожаре, более точной настройке систем детектирования первичных признаков возгорания и автоматического пожаротушения;
- предсказания развития чрезвычайной ситуации с целью минимизации человеческих и материальных потерь (в данном случае модель выступает как система поддержки принятия решений);

- подготовки персонала и пользователей зданий к действиям в чрезвычайных ситуациях, связанных с возникновением пожара;
- работы по выяснению причин возникновения пожара и оценки работы систем детектирования первичных признаков возгорания, пожаротушения и противопожарных служб.

Таблица 3

**Основные объекты пожаров за 2011 год в России по данным МЧС [1]**

Объекты пожаров	Количество пожаров, единиц	Прямой материальный ущерб от пожаров, тыс. руб.
Производственные здания и складские помещения производственных предприятий	4155	5514441
Склады, базы и торговые помещения	5107	2994070
Административно-общественные здания	3354	536197
Жилой сектор (жилые дома, общежития, дачи, садовые домики, надворные постройки и т.п.)	119207	5260273
Строящиеся объекты	1001	235772
Сооружения, установки	1173	71490
Транспортные средства (морские, речные и воздушные суда и т.д.)	23396	379048
Железнодорожный подвижной состав	101	40255
Сельскохозяйственные объекты	3900	329259
Горные выработки, пласты угля и т.д.	5	96957
Прочие объекты пожаров	7129	1822324

В данной статье рассматриваются и сравниваются различные математические модели, используемые по всему миру. Приоритет отдается моделям с открытым исходным кодом и хорошо задокументированным коммерческим продуктам.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ

В 1992 Фридман [3] провел обширное исследование, выявив 74 разных модели пожара. В 2003 году Оленик и Карпентер расширили этот список [4]. Также ими была предложена классификация, которая будет использована и в данной статье.

Математические модели пожара уже многие годы применяются для выполнения вышеперечисленных задач. Но явления, связанные с пожаром, такие как горение, турбулентные потоки, излучение и поглощение энергии, непосредственная передача тепла и др., очень тяжело поддаются точному математическому описанию. Основная проблема связана с недостатком вычислительных ресурсов с одной стороны и высокой сложностью моделей с другой. Для уменьшения вычислительной сложности применяются различные упрощения. Данные упрощения позволяют эффективно использовать модели в реальных ситуациях, но в то же время ухудшают точность и их диапазон применимости.

С другой стороны возможности компьютеров постоянно растут, что позволяет постепенно использовать более сложные и точные модели. Этим обусловлена их эволюция и историческая классификация. Все модели можно разделить на общие и частные. Общие модели пожара описывают пожар как цельное явление и состоят из множества частных моделей, описывающих отдельные аспекты этого явления (горение, передача энергии, перемешивание воздушных потоков, срабатывание датчиков и систем пожаротушения и др.).

### 2.1. Зонная модель

Зонная модель используется для предсказания развития пожара в частично замкнутых пространствах (в расчетах могут учитываться окна, дверные проходы, вентиляция), таких как одна или несколько комнат. Данная модель первой получила широкое распространение, являясь наименее сложной. В данной модели помещение делится на однородные зоны (области), и в каждой из этих областей решаются уравнения, выражающие законы сохранения. Типичное разбиение состоит из двух областей - верхней и нижней. В верхней зоне сосредоточены горячие газы (продукты горения), а в нижней зоне находится холодный воздух, пока еще не вступивший в реакцию. Пламя в данном случае переносит энтальпию из нижней зоны в верхнюю. Этот подход имеет свои недостатки и достоинства. Так, предположение о разделении пространства на указанные зоны справедливо лишь частично, т.к. постоянно происходит перемешивание воздушных масс, а скорость перемешивания зависит от конкретных параметров помещения, таких как форма (особенно потолка), особенностей вентиляции помещения и т.п. Но во многих случаях, когда не требуется знать распределение параметров в пределах области, это предположение позволяет предсказать развитие пожара с необходимой точностью. Эта модель также является вычислительно не очень сложной, что расширяет область ее применения. К серьезным недостаткам зонной модели следует отнести и то, что принятые упрощения препятствуют дальнейшему качественному развитию этой модели.

В зонной модели используются следующие основные уравнения:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i \dot{m}_i \quad (1)$$

$$c_p m \frac{dT}{dt} - A_d Z \frac{dP}{dt} = \dot{Q} + \sum_i h_i \dot{m}_i \quad (2)$$

$$p = \rho RT, \quad (3)$$

где

$\dot{m}_i$  - приток массы из  $i$ -ой области,

$\dot{Q}$  - общий приток энергии в область, обусловленный излучением, конвекцией и теплопроводностью,

$h_i$  - удельная энтальпия  $i$ -ой зоны,

$\sum_i h_i \dot{m}_i$  - суммарный приток энтальпии из всех областей в данную.

Более подробно теория и развитие зонных моделей описано в статьях Джонса [5], Квинтиера [6] и Форни [7].

## 2.2. Полевая модель

Развитие методов вычислительной гидродинамики и увеличение мощности компьютеров дало толчок к развитию нового класса моделей пожара – полевых моделей, основанных на уравнениях Навье-Стокса. Эта модель, также как и зонная, используется для предсказания развития пожара в помещениях. В полевой модели также используется разбиение пространства на области и решение уравнений, выражающих законы сохранения. Но здесь число областей значительно больше (1000–1000000). Это позволяет повысить точность предсказания в более сложных помещениях. Основой полевой модели являются уравнения Навье-Стокса, усредненные по Рейнольдсу (RANS), в частности  $k$ – $\varepsilon$  модель турбулентности, впервые представленная Патанкармом и Спалдингом [8]. Это усреднение, проводимое по времени, не позволяет учитывать тонкие аспекты явления пожара и уменьшает общую точность. Для избежания данных проблем применяется метод больших вихрей, позволяющий более точно рассчитывать турбулентное перемешивания газов. Для упрощения уравнений также используется приближения низкого числа Маха ( $< 0,3$ ) (см. статью Рема и Баума [9]), что позволяет не учитывать высокоскоростные возмущения, нехарактерные для явления пожара в целом (кроме ударных волн при взрывах и т.п.). Повышение степени разбиения также значительно увеличивает вычислительную сложность и требуемую точность входных данных для этого типа моделей.

## 2.3. Модель датчиков

Модель датчиков используется для предсказания времени срабатывания различных детекторов (дыма, температуры и др.). Модели этого типа обычно включают в себя упрощенную модель развития пожара и непосредственно модель датчиков. Эти модели используются для разработки соответствующих детекторов, для контроля их установки в помещениях, а также при интеграции с другими системами. Во многих общих моделях распространения пожара присутствуют модели датчиков как частные модели (например, в FDS).

## 2.4. Модель эвакуации

Модель эвакуации предсказывает количество времени, необходимое для эвакуации людей из горящего здания. Некоторые модели включают в себя модели распространения пожара и/или психологическую модель поведения человека в условиях чрезвычайной ситуации. Этот тип моделей может использоваться для поддержки принятия решений при эвакуации и для верификации плана здания и плана эвакуации при пожаре.

## 2.5. Модель устойчивости сооружения к огню

Модель устойчивости сооружения к огню позволяет учитывать особенности конструкции здания для предсказания влияния температуры на механические свойства. В данной модели используется разбиение конструкции здания на отдельные области и рассчитывается время до разрушения. Эта модель может дополнять и уточнять предыдущие модели. Также ее можно использовать для контроля проекта здания на предмет соответствия нормам противопожарной безопасности.

## 2.6. Прочие модели

К прочим моделям относятся модели, не вошедшие в предыдущие категории, а также модели, включающие в себя несколько из вышеперечисленных моделей.

### 3. ОБЗОР МОДЕЛЕЙ

#### 3.1. Зонные модели

##### 3.1.1. BRANZFIRE

Модель BRANZFIRE была разработана компанией Building Research Association of New Zealand (BRANZ), Новая Зеландия. BRANZFIRE является двухзонной моделью, позволяющей предсказывать распространения пожара в связанных помещениях (до 10 комнат) с учетом вентиляции и различных объектов горения. В модели вычисляются следующие параметры в верхней и нижней зонах: температура, концентрации вредных газов, воздушные потоки, обусловленные вентиляцией и пламенем, высота каждой из зон, видимость, время реакции противопожарных датчиков и системы автоматического пожаротушения. В данной модели используются дифференциальные уравнения, определяющие изменение состояния помещения через потоки энтальпии и массы за короткие промежутки времени. Эти уравнения выведены из законов сохранения энергии и массы и из уравнения состояния идеального газа. Более подробно с этой моделью можно ознакомиться в руководстве пользователя [10] и техническом руководстве [11]. BRANZFIRE распространяется бесплатно. Последняя версия ПО - 2004.1.

##### 3.1.2. CFAST/FAST

Объединенная модель пожара и распространения дыма (The Consolidated Model of Fire and Smoke Transport, CFAST) разработана в Национальном институте стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology (NIST)), распространяется бесплатно и является общественным достоянием.

- CFAST представляет собой двухзонную модель для расчета динамики распространения дыма, газов, выделяющихся при горении, температуры в помещениях здания во время пожара. Эта модель позволяет производить расчеты для широкого диапазона объемов помещений (от 1 м<sup>3</sup> до 1000 м<sup>3</sup>) [12].

- Для расчета в этой модели используется система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с заданными начальными условиями. Эти уравнения получены из законов сохранения массы и энергии, уравнения состояния идеального газа и из зависимости внутренней энергии от плотности. Эти уравнения дают функциональную зависимость давления, высоты зоны и температуры от времени, если известны общая масса и энтальпия в двух зонах.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U) \quad (4)$$

$$\frac{dV_U}{dt} = \frac{1}{P\gamma} ((\gamma - 1) \dot{h}_U - V_U \frac{dP}{dt}) \quad (5)$$

$$\frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_L V_U} ((\dot{h}_U - c_p \dot{m}_U T_U) + V_U \frac{dP}{dt}) \quad (6)$$

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_L V_L} ((\dot{h}_L - c_p \dot{m}_L T_L) + V_L \frac{dP}{dt}), \quad (7)$$

где

индексами  $L$  и  $U$  обозначены соответствующие величины в нижней (lower) и верхней (upper) зонах соответственно,  $\gamma = c_p/c_v$ ,  $h$  - энтальпия.

Описанная выше система ОДУ позволяет определить состояние каждого помещения, а при помощи специальных алгоритмов вычисляется изменение общей массы и энтальпии, требуемое для решения этой системы ОДУ. Эти изменения обусловлены очагами пожара, перемещением воздушных масс через вентиляцию, дверные и оконные проемы и др.

- Данные, необходимые для моделирования, содержатся в основном файле данных, состоящем из базы данных объектов и термодинамических свойств границ, описания возгорания (входные данные подробно описаны в [14]). В этих файлах содержится информация о геометрии здания, о свойствах строительных материалов, о связях между помещениями (вентиляция, дверные, оконные и др. проемы), об очагах возгорания (размеры, скорость горения), а также о характеристиках противопожарного оборудования (датчиков, спринклеров и т.п.). Свойства материалов описываются теплопроводностью, плотностью, толщиной, горючестью и др.

- Выходными данными модели являются температуры в верхней и нижней зоне, температуры стен, потоков воздушных масс, полов в каждом помещении, концентрации дыма и опасных газов, выделившихся в процессе горения, время срабатывания противопожарного оборудования.

Более подробную информацию о внутреннем устройстве модели можно получить в техническом руководстве [13].

Первая версия была выпущена в июне 1990. CFAST разработана на основе модели FAST [15] с целью исправления недостатков, выявленных при работе с моделью CCFM [16]. В следующих версиях были добавлены и улучшены следующие аспекты модели: алгоритмы вертикального распространения пламени, тепловые потери через проемы в потолках, нагревание и горение различных объектов, разные варианты возгорания, датчики дыма и температуры, потоки воздушных масс через дверные и оконные проемы, утечки тепла через потолки и полы, потоки в коридорах прямоугольной формы, химические свойства процесса горения. Текущая версия модели - 6.2.0.

## 3.2. Полевые модели

### 3.2.1. FDS

Модель Fire Dynamics Simulator (FDS) была разработана совместно Национальным институтом стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology (NIST)) и VTT Технический Исследовательский Центр Финляндии (VTT Technical Research Centre) [17].

- FDS использует гидродинамическую модель для вычисления перемещения воздушных потоков, вызванных пожаром. Для этого решаются уравнения Навье-Стокса, описывающие низкоскоростные потоки, вызванные изменением температуры, позволяющие рассчитать распространения дыма и распределение температуры. Ниже приведены основные уравнения, используемые в данной модели.

Уравнение переноса массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}_b^{\prime\prime}, \quad (8)$$

где

$\dot{m}_b^{\prime\prime}$  - скорость изменения массы в выделенном объеме, вызванного испарением капель и др. факторами.



Закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij}, \quad (9)$$

где

$\mathbf{u} \mathbf{u}$  - тензор второго порядка,

$\mathbf{f}_b$  - внешние силы, вызванные трением с каплями жидкости и др. факторами,

$\boldsymbol{\tau}_{ij}$  - тензор напряжений:

$$\tau_{ij} = \mu \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right); \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}; S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); i, j = 1, 2, 3 \quad (10)$$

Уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q} - \dot{q}_b - \nabla \cdot \dot{q} + \varepsilon, \quad (11)$$

где

$h_s$  - явная энтальпия,  $D()/Dt = \partial()/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla ()$  - материальная производная,

$\dot{q}$  - скорость образования теплоты на единицу объема за счет химических реакций,

$\dot{q}_b$  - скорость поглощения теплоты за счет испарения,

$\dot{q}$  - отражает тепловые потоки вследствие теплопроводности и излучения:

$$\dot{q} = -k \nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + \dot{q}_r, \quad (12)$$

где

$Y_{\alpha}$  - массовая доля газовой составляющей  $\alpha$ ,

$D_{\alpha}$  - коэффициент диффузии газовой составляющей  $\alpha$ ,

$k$  - теплопроводность.

Уравнение состояния:

$$p = \frac{\rho R T}{\bar{W}}, \quad (13)$$

где

$\bar{W}$  - средняя молярная масса газовой смеси.

В приближении низкого числа Маха внешнее давление  $p(x, y, z)$  переходит в

$$p(x, t) = \bar{p}(z, t) + p(x, t); \bar{p}(z, t) = \rho T R \sum_{\alpha} \frac{Y_{\alpha}}{W_{\alpha}}, \quad (14)$$

где

$p(x, t)$  - давление, вызванное перемешиванием,

$W_{\alpha}$  - молярная масса  $\alpha$  фракции газовой смеси.

- Для численного решения уравнений применяется явная схема предиктор-корректор второго порядка точности по пространству и времени.
- Для учета турбулентности используется модель Смагоринского для метода крупных вихрей. Также для этого можно использовать прямое численное моделирование при достаточно мелкой сетке. По умолчанию в FDS используется метод крупных вихрей.
- Для моделирования горения в простейшем случае используется одноступенчатая химическая реакция. Продукты этой реакции рассчитываются с использованием долевой модели смеси с двумя параметрами [21]. Доля смеси является постоянной скалярной величиной, которая определяется массой части одного или нескольких газов в данной точке. По умолчанию вычисляются две доли смеси. Первая - это часть массы несгоревшего топлива, а вторая - часть массы сгоревшего топлива. Для двухступенчатых реакций, в которых первая ступень - окисление топлива до монооксида углерода, а вторая - окисление монооксида до диоксида углерода, также может использоваться долевая модель смеси, но с тремя параметрами. Эти три параметра представляют собой часть несгоревшего топлива, часть топлива, прошедшего первую ступень реакции, и часть топлива, прошедшего вторую часть реакции. Из долей смеси могут быть получены массовые доли всех основных реагентов и продуктов реакции.
- В FDS также учитывается перенос тепла посредством излучения. Для этого решаются уравнения излучения для серого газа, и в некоторых случаях используется модель с широким спектром. Уравнения решаются методом конечных объемов, сходным с методом конечных элементов для конвекционного переноса. При разбиении на 100 дискретных углов, вычисление методом конечных объемов занимает 20% от времени работы всей программы, что является хорошим показателем, учитывая сложность задачи. В модели также берется в расчет изменение характера излучения при наличии спринклеров.

Более подробно уравнения и численные алгоритмы изложены в техническом описании модели [18].

- В FDS для расчета могут использоваться несколько прямоугольных сеток дискретизации.

- Для ускорения вычислений в данной модели имеется поддержка Message Passing Interface (MPI).

- Для визуализации результатов моделирования используется отдельный программный продукт Smokeview. Подробное описание Smokeview доступно в руководстве пользователя [19] и техническом руководстве [20].

Первая версия FDS была выпущена в 2000 г. Сейчас данная модель широко используется как для разработки противопожарных систем, так и для предсказания распространения пожаров в жилых и производственных помещениях [22]. FDS распространяется бесплатно и является общественным достоянием. Текущая стабильная версия модели - 5.5.3, тестовая - 6.0.7.

### 3.2.2. Kameleon Fire EX

Kameleon Fire Ex KFX представляет собой коммерческую модель, использующую уравнения гидродинамики. Разработана компанией Comput IT, Норвегия. В этой модели вычисляются дисперсия газов, воспламенение и распространение пожара. Основными особенностями KFX являются:

- использование метода конечных объемов в трехмерном пространстве;
- имеется возможность импорта CAD-моделей из других приложений (PDS, PDMS, IGES, Flacsmacro, others);
- интеграция с моделью реакции конструкции Fahts/Usfos для динамического моделирования;
- включает в себя модели, описывающие подавления пожара системами водяного пожаротушения;

- дружественный интерфейс для предобработки и постобработки данных;
- данная модель была разработана ComputIT/NTNU/SINTEF в сотрудничестве с Statoil (N), Total (F), ENI-group (I), Conoco Phillips (N,USA), Gaz de France (F), Ruhrgas (D) and Sandia National Laboratories (USA);
- 20 лет используется для решения задач противопожарной безопасности по всему миру;
- модель постоянно совершенствуется, начиная с ее появления в 70-х годах.

### 3.2.3. SMARTFIRE

Модель SMARTFIRE разработана в Университете Гринвича, Соединённое Королевство, группой Fire Safety Engineering Group (FSEG). SMARTFIRE коммерческий продукт. Основой SMARTFIRE также является теория вычислительной гидродинамики для моделирования распространения пожаров. Данная модель - результат 20-летнего опыта моделирования пожаров группой FSEG.

Основные достоинства SMARTFIRE состоят в следующем:

- удобная в использовании интегрированная среда для исследования распространения пожара и дыма;
- мощный интерфейс для разработки сценариев позволяет импортировать модели многоэтажных зданий (в т.ч. и в 2D формате DXF);
- окружение для создания спецификации сценария позволяет задать граничные условия, физические и временные свойства, настроить вычислительные алгоритмы;
- система автоматического построения вычислительной сетки оптимизирована для задач анализа пожаров с учетом моделируемой геометрии, она также предоставляет возможность ручной настройки сетки;
- пользователю предоставляется доступ ко всем параметрам модуля расчета во время работы, позволяя осуществлять тонкую настройку работы модели тогда, когда это необходимо;
- поддержка множества форматов выходных данных, в т.ч. и зонного формата, используемого для модели эвакуации EXODUS;
- умеренные требования к вычислительным ресурсам позволяют использовать данную модель в множестве реальных приложений;
- поддержка параллельного вычисления позволяет использовать кластерные технологии, что снижает время вычислений;
- удобная система визуализации Data View дает пользователю быстрый и эффективный доступ к результатам моделирования.

## 3.3. Модели эвакуации

### 3.3.1 EXODUS

Модель эвакуации EXODUS разработана группой Fire Safety Engineering Group (FSEG) из Университета Гринвича, Соединённое Королевство.

- EXODUS может использоваться как для моделирования процесса эвакуации, так и для общего анализа перемещения людей из здания.
- Данное ПО разработано в соответствии с требованиями по безопасности и позволяет верифицировать планы эвакуации.
- EXODUS включает в себя модели взаимодействия человек-человек, человек-пожар и человек-здание.
- В данную модель включены пакеты для моделирования поведения людей в зданиях, морских и воздушных судах.
- В EXODUS предусмотрена интеграция с моделью распространения пожара SMARTFIRE.

### 3.3.2. FDS+Evac

Модель FDS+Evac была разработана Центром Технических Исследований Финляндии VTT (VTT Technical Research Centre of Finland). FDS+Evac является модулем к Fire Dynamics Simulator (FDS), позволяющим моделировать процесс эвакуации.

- Для предсказания поведения людей используется агентная модель.
- Моделирование эвакуации при помощи FDS+Evac полностью интегрируется с процессом моделирования распространения пожара в FDS.
- Алгоритмы движения людей основаны на модели паники.
- FDS+Evac позволяет легко задавать сценарии эвакуации в текстовом виде.
- Для визуализации полученных результатов используется Smokeview для FDS.
- При моделировании учитывается воздействие дыма, вредных газов и др. результатов пожара на эвакуируемых людей.

Более подробную информацию о данной модели можно получить в ее описании [23].

Данный модуль является частью FDS и распространяется бесплатно.

### 3.3.3. Legion Evac

Legion Evac является коммерческой моделью, разработанной английской компанией Legion Limited.

- Данная модель является независимым продуктом, предназначенным для моделирования и анализа сценариев эвакуации.
- Legion Evac позволяет рассчитывать процесс эвакуации на таких объектах, как железнодорожные станции, спортивные стадионы, аэропорты, офисные здания, театры и др.
- Данная модель базируется на проверенном и точном симуляторе перемещения людей Space Works.
- Evac состоит из двух приложений: Model Builder для задания физических и функциональных свойств модели перемещения людей и Analyser для выполнения расчетов, визуализации и проведения анализа полученных данных.
- Данная модель совместима с Fire Dynamic Simulation (FDS).

## 3.4. Модели устойчивости к огню

### 3.4.1. BISTRA

Данная модель является коммерческим продуктом, разработанным компанией Physibel, Бельгия. Она позволяет рассчитать распространение тепла в двумерных объектах произвольной формы.

- В модели учитываются зависимость теплопроводности от температуры и от градиента температуры.
- В BISTRA также входит нелинейная модель расчета излучения.
- Поддерживаются динамические граничные условия. Они могут задаваться множеством функций: константа, шаговая функция, периодическая, пользовательская.
- Для расчета температуры используется метод конечных разностей Кранка-Николсона.
- Имеются функции визуализации и обработки результатов моделирования.
- Соответствует требованиям по пожарной безопасности Евросоюза.

### 3.4.2. BRANZ TR8 и TR9

Модели TR8 и TR9 были разработаны компанией Building Research Association of New Zealand (BRANZ), Новая Зеландия, и применяются для предсказания воздействия пожара на бетонные конструкции. Эти модели также могут использоваться для проектирования специальных устойчивых к пожару конструкций. Модели TR8 и TR9 основаны на рекомендациях по проектированию бетонных конструкций с учетом пожарной безопасности [25]. Более подробную информацию об использовании данной модели можно получить в документации [24] и [26]. TR8 и TR9 распространяется бесплатно. Последняя версия программы - 2.6 и 2.0 соответственно.

### 3.4.3. SAFIR

Модель SAFIR разработана в университете Льежа, Бельгия, и применяется для анализа характеристик конструкций зданий под воздействием различных температурных условий.

- Данная модель позволяет рассчитывать распределение температуры в конструкциях под воздействием пожара.
- Также моделируется поведение конструкции при разных температурах с учетом изменения геометрии конструкции, термического расширения, нелинейных механических свойств конструкции.
- Рассчитывается крутильная жесткость.
- Алгоритм расчета основан на методе конечных элементов.
- SAFIR может использоваться для моделирования одно-, двух- и трехмерных конструкций.

Подробную информацию об использовании и технических особенностях модели можно получить в документации [27], [28].

### 3.4.4. VOLTRA

Модель VOLTRA разработана компанией Physibel, Бельгия. Данная модель является коммерческим продуктом, позволяющим рассчитать распространение тепла в трехмерных объектах произвольной формы.

- В модели учитываются зависимость теплопроводности от температуры и от градиента температуры.
- В VOLTRA также входит нелинейная модель расчета излучения.
- Поддерживаются динамические граничные условия. Они могут задаваться множеством функций: константа, шаговая функция, периодическая, пользовательская.
- Для расчета температуры используется метод конечных разностей Кранка-Николсона.
- Имеются функции визуализации и обработки результатов моделирования.
- Соответствует требованиям по пожарной безопасности Евросоюза.

## 3.5. Прочие модели

### 3.5.1. Pyro Sim

Pyro Sim - это графический интерфейс пользователя, разработанный американской компанией Thunder head Engineering Consultants, Inc. Pyro Sim - коммерческий продукт.

- Pyro Sim добавляет инструменты для создания и редактирования трехмерной геометрической модели.
- Полная интеграция с FDS и Smokeview.

- Полная поддержка 32 и 64-битных ОС.
- Позволяет легко настраивать процесс моделирования на многопроцессорных системах и кластерах.
- Поддерживается импорт существующих моделей из FDS версии 4 и 5, импорт 2D/3D моделей из AutoCAD (DWG, DXF, STL).

Подробности по работе с ПО можно получить в документации [29]. Последняя версия ПО - 2012.1.1101.

#### 4. Заключение

Обзор показал, что на данный момент существует достаточно большое количество моделей пожара как в коммерческом исполнении, так и в открытом доступе. Наибольший интерес для дальнейшего исследования представляет связка FDS+Smokeview+Evac, т.к. она является самой развитой открытой моделью пожаров и активно поддерживается научным сообществом и Национальным институтом стандартов и технологий США. Также следует обратить внимание на модель CFAST, позволяющую выполнять моделирование с приемлемой точностью для многих задач, но при этом умеренно расходующую вычислительные ресурсы.

#### Литература

1. Сведения о пожарах и их последствиях за январь-декабрь 2011 г. Департамент надзорной деятельности МЧС России [Электрон. ресурс]. – 2012. – URL: <http://mchs.gov.ru/upload/dndstatk.doc> (дата обращения: 12.03.2011).
2. Fire loss in the United States during 2011. National Fire Protection Association [Электрон. ресурс]. – 2012. – URL: <http://www.nfpa.org/assets/files/pdf/os.fireloss.pdf> (дата обращения: 24.04.2012).
3. Friedman R. An International Survey of Computer Models for Fire and Smoke // SFPE Journal of Fire Protection Engineering. – 4 (3). – 1992. – P. 81-92.
4. Olenick S.M., Carpenter D.J. An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke // SFPE Journal of Fire Protection Engineering. – 13 (2) – 2003. – P. 87-110.
5. Jones W.W. A Review of Compartment Fire Models. National Bureau of Standards [Электрон. ресурс]. – 1983. – URL: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire83/PDF/f83001.pdf> (дата обращения: 24.04.2012).
6. Quintiere J.A Perspective on Compartment Fire Growth. National Bureau of Standards. - 1984.
7. Forney G.P., Moss W.F. Analyzing and Exploiting Numerical Characteristics of Zone Fire Models// Fire Science and Technology. – Vol. 14.– №1/2. – 1994. – P. 49-60.
8. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing [Электрон. ресурс]. – 1980. – URL:<ftp://www.demec.ufmg.br/ema255/Bibliografia/Patankar-1980.pdf> (дата обращения: 24.04.2012).
9. Rehm R.G., Baum H.R. Equations of Motion for Thermally Driven, Buoyant Flows // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – Vol. 83. – 1978. – №3. – P. 297-308.
10. Wade C.A. A User's Guide to BRANZFIRE. Building Research Association of New Zealand [Электрон. ресурс]. – 2004. – URL: <http://www.branzfire.com/downloads/userguide.pdf> (дата обращения: 28.04.2012).
11. Wade C.A. BRANZFIRE Technical Reference Guide. Building Research Association of New Zealand [Электрон. ресурс]. – 2004. – URL: <http://www.branzfire.com/downloads/techref.pdf> (дата обращения: 28.04.2012).

12. Peacock R.D., Jones W.W., Reneke P.A., Forney G.P. CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) User's Guide. National Institute of Standards and Technology [Электрон. ресурс]. – 2008. – URL: [http://www.nist.gov/customcf/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=861538](http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=861538) (дата обращения: 28.04.2012).
13. Jones W.W., Peacock R.D., Forney G.P., Reneke P.A. CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology [Электрон. ресурс]. – 2009. – URL: [http://www.nist.gov/customcf/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=861553](http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=861553) (дата обращения: 15.05.2012).
14. Gross D. Data Sources for Parameters Used for Predictive Modeling of Fire Growth and Smoke Spread. National Institute of Standards and Technology [Электрон. ресурс]. – 1985. – URL: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire85/PDF/f85001.pdf> (дата обращения: 13.05.2012).
15. Jones W.W., Peacock R.D. Technical Reference Guide for FAST Version 18. Final Report. National Institute of Standards and Technology [Электрон. ресурс]. – 1989. – URL: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire89/PDF/f89007.pdf> (дата обращения: 13.05.2012).
16. Cooper L.Y., Forney G.P. Consolidated Compartment Fire Model (CCFM) Computer Code Application CCFM.VENTS. Part 1. Physical Basis. National Institute of Standards and Technology [Электрон. ресурс]. – 1990. – URL: [http://www.nist.gov/customcf/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=912565](http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=912565) (дата обращения: 27.07.2012).
17. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide. National Institute of Standards and Technology [Электрон. ресурс]. – 2010. – URL: <http://code.google.com/p/fds-smv> (дата обращения: 27.07.2012).
18. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., Baum H., Rehm R., Mell W., McDermott R. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology [Электрон. ресурс]. – 2010. – URL: <http://code.google.com/p/fds-smv> (дата обращения: 27.07.2012).
19. Forney G.P. Smokeview (Version 6) - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I: User's Guide. National Institute of Standards and Technology [Электрон. ресурс]. – 2012. – URL: <http://code.google.com/p/fds-smv> (дата обращения: 27.07.2012).
20. Forney G.P. Smokeview (Version 6) - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume II: Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology [Электрон. ресурс]. – 2012. – URL: <http://code.google.com/p/fds-smv> (дата обращения: 27.07.2012).
21. Floyd J.E., Baum H.R., McGrattan K.B. A MIXTURE FRACTION COMBUSTION MODEL FOR FIRE SIMULATION USING CFD. National Institute of Standards and Technology [Электрон. ресурс]. – 2001. – URL: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire01/PDF/f01077.pdf> (дата обращения: 19.07.2012).
22. Boehmer H., Floyd J., Gottuk D.T. Fire Dynamics and Forensic Analysis of Limited Ventilation Compartment Fires Volumes 1 & 2. Hughes Associates, Inc. [Электрон. ресурс]. – 2009. – URL: <https://www.ncjrs.gov/App/Publications/abstract.aspx?ID=252196>, <http://www.ncjrs.gov/App/publications/abstract.aspx?ID=252197> (дата обращения: 19.07.2012).
23. Korhonen T., Hostikka S. Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and User's Guide. VTT [Электрон. ресурс]. – 2009. – URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2009/W119.pdf> (дата обращения: 19.07.2012).
24. Wade C.A., Lovatt A.J. User's Guide to BRANZ TR8. Software for Calculating Fire Resistance of Concrete Beams and Floor Systems. Building Research Association of New Zealand [Электрон. ресурс]. – 2009. – URL: [http://www.branz.co.nz/cms\\_show\\_download.php?id=79eb15dd7e5048b6171d1eb3cd773b2c05590d98](http://www.branz.co.nz/cms_show_download.php?id=79eb15dd7e5048b6171d1eb3cd773b2c05590d98) (дата обращения: 20.08.2012).
25. Wade C.A. Method for Fire Engineering Design of Structural Concrete Beams and Floor Systems. Building Research Association of New Zealand. – 1991.

## Научно-теоретические и инженерно-технические разработки

26. Collier P.C. RюSoftware for the design of light timber frame construction for fire resistance - A user's guide - Version 2.0 Building Research Association of New Zealand [Электрон. ресурс]. – 2008. – URL: <http://www.branz.co.nz/branzltd/pdfs/TR9.pdf> (дата обращения: 20.08.2012).
27. Franssen J. M. USER'S MANUAL FOR SAFIR. University of Liege [Электрон. ресурс]. – 2011. – URL: <http://www.argenco.ulg.ac.be/logiciels/SAFIR/download/SAFIR%202011%20manual.pdf> (дата обращения: 14.10.2012).
28. SAFIR Technical documentation. University of Liege [Электрон. ресурс]. – 2011. – URL: <http://www.argenco.ulg.ac.be/logiciels/SAFIR/download/Technical%20Reference%20of%20SAFIR.pdf> (дата обращения: 14.10.2012).
29. Pyro Sim User Manual. Thunderhead Engineering Consultants, Inc. [Электрон. ресурс]. – 2010. – URL: <http://www.thunderheadeng.com/downloads/pyrosim/PyroSimManual.pdf> (дата обращения: 14.10.2012).

## Сведения об авторе

*Свирин Илья Сергеевич*, ЗАО «Нордавинд»; 141983, Московская обл., г. Дубна, ул. Программистов, д. 4, оф. 371, Тел. 8(499)608-01-88, E-mail: [info@nordavind.ru](mailto:info@nordavind.ru)