

ISSN 1812-5220  
© Проблемы анализа риска, 2009

# Анализ пожарных рисков. Часть I: Подходы и методы

**С.Е. Якуш,**

ООО «Бюро пожарных исследований»,  
Институт проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского  
РАН (ИПМех РАН),  
Москва

**Р.К. Эсманский,**

ООО «Бюро пожарных исследований»,  
Москва

## Аннотация

Рассмотрены современные подходы к анализу пожарного риска зданий и сооружений и их роль с точки зрения перехода к гибкому нормированию требований пожарной безопасности. Обсуждаются вероятностный и эвристический подходы к оценке пожарного риска, проанализирован мировой опыт создания и использования соответствующих методов и программных средств для их реализации. Проанализированы особенности применения вероятностного анализа на основе логических деревьев для зданий и сооружений. Приведены примеры индексных методов для оценки пожарной опасности и риска объектов различного назначения.

**Ключевые слова:** анализ риска, пожарная безопасность, вероятностные методы, индексные методы.

ISSN 1812-5220  
© Issues of Risk Analysis, 2009

# Analysis of Fire Risks. Part I: Approaches and Methods

**S.E. Yakush,**

Bureau of Fire Research,  
A.Yu. Ishlinskii Institute  
for Problems  
in Mechanics, RAS,  
Moscow

**R.K. Esmanskiy,**

Bureau of Fire Research,  
Moscow

## Abstract

Modern approaches to the analysis of fire risks for buildings and structures are considered, and their role from the viewpoint of changing over to flexible normalization of fire safety regulations is discussed. The probabilistic and heuristic approaches to fire risk assessment are considered and the world experience in development and practical application of relevant methods and their implementation as software tools are discussed. The issues arising from application of probabilistic analysis based on the logic trees approach to buildings and structures are discussed. Examples of indexing methods used for assessment of fire hazard and risks of objects of various applications are presented.

**Key words:** risk analysis, fire safety, probabilistic methods, indexing methods.

## Содержание

1. Введение
  2. Пожарная опасность и риск
  3. Вероятностный подход к анализу риска
  4. Эвристический подход к анализу риска
- Заключение  
Литература
- 

### 1. Введение

В связи с принятием в 2008 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1] особую актуальность приобретают выработка и внедрение в отечественную практику научно обоснованных методик количественной оценки пожарного риска, позволяющих устанавливать соответствие реально существующего уровня риска законодательно установленному предельному значению.

В последние десятилетия в большинстве промышленно развитых стран происходит переход от жесткого нормирования требований пожарной безопасности при проектировании зданий и сооружений к гибкому или объектно-ориентированному нормированию [2—5]. Сущность этого подхода состоит в том, что устанавливаются цели, которым должна соответствовать система пожарной безопасности объекта (это отражается и в принятой в англоязычной литературе терминологии — *performance-based codes* в дословном переводе означает нормирование, основанное на выполнении задачи), но не регламентируются проектные решения для их достижения. Тем самым к минимуму сводятся ограничения в устройстве объекта, стимулируется использование новых подходов к обеспечению пожарной безопасности и в конечном итоге обеспечивается более высокая экономическая эффективность проектных решений [6].

Если при традиционном подходе проектные решения систем пожарной безопасности жестко регламентированы, то при гибком нормировании, когда возможны альтернативные проектные решения, значительно возрастает потребность в разработке и практическом использовании методов для оценки пожароопасности объектов и пожарного риска. Эти методы должны позволять на основании заданных характеристик объекта (конструкция, предназна-

чение, количество находящихся людей, имеющиеся средства противопожарной защиты) прогнозировать возникновение и развитие пожара, эвакуацию людей, оценивать возможный ущерб и последствия. Лишь имея количественные данные о поведении такой сложной системы в условиях пожара, можно установить степень соответствия применяемых для данного объекта проектных решений нормативным требованиям по пожарной безопасности. Кроме того, методы количественного прогноза развития и последствий пожара необходимы для оценки экономической эффективности различных проектных решений, а также для определения тарифов страхования ответственности и имущественного страхования при пожарах.

Как показывает анализ литературы, в настоящее время в мире отсутствует единый метод оценки пожарного риска, который был бы принят в качестве обязательного в нормативной документации, регламентирующей вопросы пожаробезопасности [7, 8]. В промышленно развитых странах способ анализа риска (как правило, на основе логических деревьев) и конкретные методики его оценки законодательно устанавливаются для объектов, представляющих повышенную опасность, — атомных электростанций, хранилищ и терминалов сжиженного природного газа, производств взрывчатых веществ [9]. Для остальных объектов законодательно устанавливаются лишь общие принципы, по которым должен оцениваться пожарный риск, тогда как методики расчетов издаются в качестве рекомендаций, сопровождающих соответствующие стандарты [9—15]. В качестве расчетных методов допускается применять как качественный анализ, так и количественный, включая индексные методы и полный вероятностный анализ. Выбор метода должен производиться в соответствии с целями проведения анализа риска, имеющимися данными об объекте,

материальными и людскими ресурсами, с учетом временных и финансовых ограничений.

В Российской Федерации также постепенно происходит переход к практике гибкого нормирования в области пожарной безопасности. Методы оценки пожарного риска определены государственными стандартами [16, 17]. Нормативное значение пожарного риска для зданий, сооружений и строений установлено федеральным законом [1]. Согласно статье 79 этого закона «Индивидуальный пожарный риск в зданиях, сооружениях и строениях не должен превышать значение одной миллионной в год при размещении отдельного человека в наиболее удаленной от выхода из здания, сооружения и строения точке». В соответствии со статьей 93 «Для производственных объектов, на которых обеспечение величины индивидуального пожарного риска одной миллионной в год невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов, допускается увеличение индивидуального пожарного риска до одной десятичной в год». Порядок расчета индивидуального пожарного риска определен методикой [18]. Кроме того, за последнее десятилетие принят ряд международных ГОСТов по анализу и менеджменту риска в более широком понимании [19—21].

Таким образом, анализ риска быстрыми темпами становится одним из необходимых инструментов при проектировании объектов, их эксплуатации и пожарном аудите. В связи с этим имеется настоятельная потребность проанализировать современное состояние проблемы количественной оценки пожарного риска, достигнутый уровень знаний в этой области и сопоставить принятые в нашей стране подходы с используемыми в мире.

Цель настоящей работы состоит в анализе современных подходов к оценке пожарного риска и практики их использования. Объектом исследования являются пожары в зданиях различного назначения (жилых, административных, общественных и т. д.). Оценка риска производственных объектов и технологических установок, а также при чрезвычайных ситуациях других типов (например, при выбросах токсичных веществ) затрагивается лишь с точки зрения общности методологических подходов, при необходимости соответствующие методики могут быть найдены в обширной специализированной

литературе по промышленной безопасности. В первой части работы основное внимание уделяется рассмотрению вероятностного и эвристического подходов к анализу пожарного риска и обзору различных методов, реализующих эти подходы. Вторая часть посвящена обсуждению областей наиболее целесообразного применения вероятностного и эвристического подходов при оценке пожарного риска, а также практическим проблемам вероятностного расчета индивидуального риска.

## 2. Пожарная опасность и риск

Понятия «опасность» и «риск» являются весьма многогранными, и их определения в значительной степени зависят от контекста и области знания, в которой они вводятся и рассматриваются [22—26]. Применительно к пожарной опасности и пожарному риску в настоящее время в целом сложилась терминология, используемая в научной литературе и нормативных документах. Так, согласно [1] *пожарная опасность объекта защиты* — это состояние объекта защиты, характеризующее возможность возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара, тогда как *пожарный риск* — это мера возможности реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей. Эти определения в целом согласуются с используемыми в зарубежной литературе и нормативных документах понятиями *fire hazard* и *fire risk* [8—11, 27].

Существующие методы оценки потенциальных последствий пожаров делятся на две категории. К первой из них (анализ пожароопасной ситуации, или *hazard analysis*) можно отнести методы анализа, направленные на изучение характеристик пожара и его воздействия на людей и имущество, при заданном сценарии (который включает совокупность исходных данных по геометрии помещения, параметры очага горения, состояние вентиляционных проемов, исходное положение находящихся в здании людей и т. п.). При таком подходе, как правило, используются детерминистские математические (интегральные, зонные или дифференциальные) либо физические (полномасштабные или уменьшенные в размерах) модели пожара. Целью исследований является получение количественных данных о характеристиках окружающей среды при реализации данного сценария.

рия пожара, ее поражающем действии и возможном материальном ущербе. При этом не рассматриваются вопросы о вероятности реализации данного сценария, влияния неопределенностей в свойствах охваченного горением материала, поведенческих особенностей людей при эвакуации и т. п.

Ко второй категории (анализ риска, или *risk analysis*) относятся методы, в которых центральное место занимает анализ факторов, носящих случайный характер, — от расположения места загорания и количества вовлеченных в горение материалов до срабатывания или отказа систем оповещения и пожаротушения, обрушения элементов конструкций, возникновения паники и т. д. Каждая реализация перечисленных состояний по существу определяет сценарий пожара, поэтому анализ опасностей и последствий отдельных сценариев входит составной частью в анализ риска [8, 27].

В зависимости от рассматриваемых последствий различают несколько видов риска [22]. *Индивидуальный* риск характеризует вероятность поражения отдельного человека в результате воздействия на него пожара, *коллективный* риск — ожидаемое количество пострадавших или погибших за определенный период времени, тогда как *социальный* риск представляет собой вероятность одновременного поражения группы людей заданной численности и выражается в виде соответствующей F/N диаграммы. *Материальный* риск характеризует ожидаемые социально-экономические потери от пожара и может выражаться как в виде математического ожидания экономического ущерба, так и в виде F/G диаграмм. Рассматривают также риск *косвенных материальных потерь* (например, от приостановки производственного процесса) и *экологический* риск [28].

Целью анализа риска может быть как установление абсолютного уровня риска для сравнения его с предельно допустимым значением и оценки достаточности уровня противопожарной защиты, так и определение относительного уровня риска для сравнения уровней пожаробезопасности различных объектов либо выбора альтернативных проектных решений на одном объекте.

Пожарный риск, как мера возможности реализации пожарной опасности, по своей сути учитывает как вероятность возникновения опасной ситуации, так и степень тяжести ее последствий. В зависимо-

сти от того, на каком уровне производится описание каждого из указанных элементов, имеется целый спектр методов оценки риска. Отметим, что для анализа пожарного риска применимы общие методы оценки риска технологических систем [19], естественно, с учетом специфики пожара как вида аварии. Согласно [9] имеющиеся методы классифицируются следующим образом.

1. В *качественных* методах как вероятность, так и последствия выражаются на уровне качественного описания. Примером может служить заполнение проверочных листов (в виде ответа на вопросы «Что будет, если...?»), составление «матриц риска» (таблиц, столбцы которых соответствуют различной тяжести последствий, от незначительных до катастрофических, а строки — вероятности событий, от пренебрежимо малой до высокой, с соответствующей классификацией ячеек таблицы по степени риска от низкого до высокого) [8, 9, 19, 22]. Качественные методы также включают и анализ логических деревьев событий, если результат анализа формулируется на описательном уровне (высокий или низкий уровень риска, незначительный риск и т. д.) [4].

2. В *полуколичественных* методах часть аспектов рассматривается количественно, а другая часть — на качественном уровне. К таким методам можно отнести построение логических деревьев событий при пожаре и расчет вероятности реализации различных сценариев без исследования последствий каждого сценария. Примером может служить построение логического дерева событий с целью определения вероятности самопроизвольного затухания пожара, тушения пожара средствами ручного пожаротушения или системами автоматического пожаротушения, распространения на смежные помещения, перехода от локализованного горения к объемной вспышке и т. д. Наоборот, качественные доводы могут использоваться для выбора одного или нескольких сценариев аварии, а исследования сценариев могут проводиться количественно на основе математического моделирования с привлечением детерминистских моделей. К данному типу относится традиционный анализ опасностей при «наихудшем» сценарии пожара на основе интегральных, зонных или дифференциальных (полевых) моделей. К этому же классу относятся и методы индексирования и ранжирования риска [2, 4, 14],

в которых качественные доводы используются при формировании набора атрибутов (факторов), определяющих пожарную опасность и защищенность объекта. Выбранные атрибуты оцениваются в некоторых внутренних единицах (баллах) с последующим выведением итоговой оценки и ее интерпретацией с точки зрения достаточности пожарной безопасности объекта.

3. Наконец, *количественные* методы оценки риска включают расчет обеих составляющих риска (вероятности и последствий). Риск определяется как вероятность наступления тех или иных опасных последствий пожара (гибель людей, материальный ущерб, экономические потери) в единицу времени — как правило, за год [24] (поэтому наряду с термином «вероятность» зачастую употребляется понятие «частота реализации»). Такое количественное определение риска является общепринятым и широко используется при анализе различных опасностей техногенного характера [22—25, 29]. Для расчета вероятности и последствий различных сценариев пожара могут применяться методы статистического анализа, детерминистское, имитационное и стохастическое моделирование [3], анализ логических деревьев событий и отказов [19—23].

### 3. Вероятностный подход к анализу риска

#### 3.1. Основные положения. Анализ логических деревьев

Количественная оценка риска на основе вероятностного подхода является основой значительного числа современных методов анализа пожарных рисков. Эти методы представляют особый интерес в свете принятого закона [1], где требуется оценка абсолютного индивидуального риска. Поэтому в данном разделе вероятностные методы рассматриваются в достаточно широком контексте, позволяющем установить современный уровень знаний, а также развитые в мире методы и программные средства, относящиеся непосредственно к пожарным рискам для зданий и сооружений.

При вероятностном подходе риск какого-либо события  $R$  определяется как

$$R = P \cdot U, \quad (1)$$

где  $P$  — вероятность реализации данного события,  $U$  — ожидаемый ущерб от этого события. Если ущерб может возникать в результате  $N$  различных событий, то совокупный риск определяется суммированием по всем возможным событиям:

$$R = \sum_{i=1}^N P_i \cdot U_i. \quad (2)$$

Таким образом, количественная оценка риска сводится к выявлению возможных сценариев развития опасной ситуации и определению последствий каждого сценария. Методы количественного анализа риска с успехом применяются для оценки опасностей в таких отраслях техники, как машиностроение, аэрокосмическая отрасль, ядерная энергетика [22, 29—31]. К настоящему времени разработан и с успехом применяется формальный аппарат анализа риска, включающий построение логических деревьев (дерево неисправностей, позволяющее анализировать совокупность событий, приведших к наступлению заданного результата; дерево событий, позволяющее анализировать последствия данного инициирующего события), оценка неопределенности, анализ чувствительности и т. д. [19—21]. Например, дерево неисправностей может быть использовано для оценки вероятности возникновения аварийной ситуации, а дерево событий — при анализе различных путей развития аварийной ситуации и определении ее последствий. При оценке вероятностей отдельных событий  $P_i$  используются статистические данные, а вероятный ущерб при каждом сценарии  $U_i$  может определяться методами математического моделирования.

Применительно к проблемам пожаровзрывобезопасности вероятностные методы наиболее широкое применение нашли для оценки рисков техногенных аварий на производственных объектах, связанных с хранением и переработкой опасных веществ, в том числе наружных технологических установок (взрывы резервуаров высокого давления и трубопроводов, выбросы токсичных веществ, пожары разлитий и т. п.) [32—34]. Можно сказать, что дерево событий, описывающее возможные сценарии развития аварии после разгерметизации резервуара высокого давления, включающее такие явления, как пожар разлития, огненный шар, пожар-вспышка, факельное горение, является классическим приме-



Рис. 1. Дерево событий аварии на установке первичной переработки нефти [36]

ром, который приводится во многих литературных источниках [2, 8, 33—37]. На рис. 1 приведен пример дерева событий для аварии на установке первичной переработки нефти [36]. Для определения риска определенного ущерба (например, поражения персонала тепловым излучением) каждый сценарий (ветвь дерева событий) должен быть детализирован с точки зрения вероятностей реализации в точках ветвления, а также количественной оценки последствий. Отметим, что на рис. 1 представлены условные вероятности развития аварии при реализации инициирующего события, для нахождения абсолютных вероятностей реализации за определенный промежуток времени их следует умножить на вероятность (частоту реализации) выбросов нефти.

### 3.2. Особенности вероятностного анализа пожарного риска для зданий

Методика анализа риска на основе логических деревьев применима и для анализа риска при пожарах в зданиях и сооружениях. В зависимости от интересующего типа опасности возможно построение не-

скольких деревьев событий. Так, при оценке риска для жизни людей наиболее адекватным является дерево событий, в которое включены характер развития пожара, срабатывание или отказ системы пожарной сигнализации и оповещения, работа систем автоматического пожаротушения и противодымной защиты, напрямую влияющие на распространение дыма по зданию и возможность своевременной эвакуации людей. Если же оценивается материальный риск, целесообразно строить дерево событий с учетом огнестойкости преград и возможности распространения пожара на соседние помещения.

Возможный пример дерева событий при пожаре в помещении приведен на рис. 2 (по материалам [19]), где в качестве инициирующего события рассматривается взрыв пыли, однако аналогичные деревья событий могут быть построены и для других источников загорания. Важно, что каждая ветвь дерева дает сценарий, который имеет существенные особенности с точки зрения динамики нарастания опасности пожара и реакции людей, поэтому возможность своевременной эвакуации должна оцениваться



Рис. 2. Пример дерева событий для пожара, вызванного взрывом пыли [19]

для каждого сценария отдельно. Лишь определив в каждом случае риск невозможности безопасной эвакуации, можно определить суммарный индивидуальный риск в заданном сооружении.

Несомненным достоинством вероятностного подхода к количественной оценке риска в задачах пожаровзрывобезопасности является формализованная процедура системного анализа на основе логических деревьев, которые в наглядном виде позволяют представить возможные события и взаимосвязь между ними. Однако проведение анализа с высокой детализацией рассматриваемых процессов кроет в себе и основной недостаток метода — его высокую трудоемкость [8]. Для объектов сложной структуры логические деревья быстро становятся столь разветвленными, что для их эффективного анализа необходимо применение соответствующих программных средств. Определение условных вероятностей в узлах дерева зачастую вызывает зна-

чительные трудности, поскольку соответствующая статистика может отсутствовать, равно как и данные для расчета этих вероятностей с использованием дерева отказов.

Другую проблему представляет расчет последствий каждого сценария. Успешное применение вероятностных методов в задачах промышленной пожаровзрывобезопасности во многом связано с тем, что для аварий такого типа область воздействия поражающих факторов (ударной волны, теплового излучения, токсического облака) удается описать относительно простыми аналитическими моделями и эмпирическими корреляциями, которые легко использовать в контексте вычисления риска отдельных сценариев и определения суммарного риска [17, 33—35, 38—40]. Для оценки индивидуального риска, связанного с поражающими факторами аварии, широкое применение нашел аппарат пробит-функций, позволяющий связать условную вероят-

ность поражения различного типа (гибель людей, ожоги различной степени тяжести и т. п.) с интенсивностью и продолжительностью воздействия определенного поражающего фактора. Результаты анализа риска, как правило, представляются в виде одномерных профилей риска либо двумерных карт риска, показывающих распределение величины риска от опасного объекта по окружающей территории [36—42].

Для пожаров в помещениях, где существенную роль в развитии пожара и распространении дыма играет взаимодействие с ограждающими конструкциями, простые аналитические модели, как правило, отсутствуют. Кроме того, специфической особенностью является необходимость учета действия или отказа систем противопожарной защиты и расчета времени эвакуации с учетом поведенческих особенностей людей (задержка начала эвакуации в зависимости от контингента, типа системы оповещения, возможность возникновения паники и т. п.) [43]. На начальной стадии пожара, наиболее важной с точки зрения эвакуации людей, необходим учет образования и опускания дымового слоя, что ограничивает применимость простых интегральных моделей для среднеобъемных характеристик и требует использования зонных моделей (что возможно только в помещениях простой формы) или моделей, основанных на методах вычислительной гидродинамики (CFD), с соответствующими вычислительными затратами. Поэтому в полном объеме вероятностная оценка риска может проводиться лишь как специальное исследование для индивидуальных объектов при условии наличия соответствующего программного обеспечения и кадров, обладающих высокой квалификацией и опытом проведения расчетов.

Для того чтобы приблизить вероятностные методы к требованиям практики, возможны два приема. Первый из них состоит в уменьшении числа рассматриваемых сценариев: на основе предварительного анализа близкие по характеристикам сценарии объединяются в кластеры сценариев, и затем из каждого кластера выбирается один представительный сценарий, для которого и производится вероятностный анализ и анализ последствий. Эта процедура не может быть формализована, хотя ее общие принципы разработаны достаточно детально [13]. В частности, указывается, что сценарии с малой

вероятностью и тяжелыми последствиями могут давать вклад в общий риск, сравнимый с часто реализуемыми, но незначительными по последствиям сценариями. На этапе предварительного анализа необходимо не допустить как отбрасывания сценариев первого типа, так и чрезмерной детализации сценариев второго типа.

Другим возможным приемом является рассмотрение большого числа сценариев, но использование максимально упрощенных моделей пожара. В частности, вместо зонных моделей могут использоваться корреляции, обобщающие их результаты в виде простых соотношений [3]. Тем самым предполагается, что случайный характер входных параметров более важен, чем точность расчета каждого конкретного случая. В определенном смысле данный подход аналогичен разыгрыванию большого числа реализаций в методе Монте-Карло.

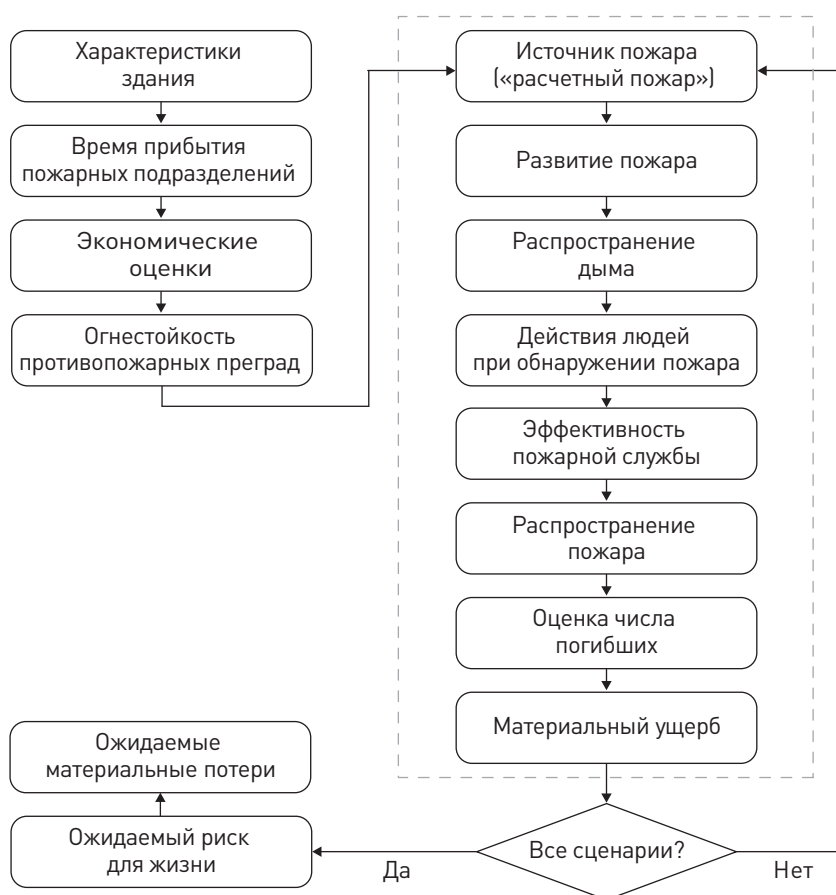
В настоящее время нет ясности, какой из указанных приемов предпочтительней для количественного анализа риска. Однако очевидно, что ни один из них не может быть реализован без применения соответствующих программных средств. На данный момент в мире имеется ряд программных пакетов для анализа риска, например, CRISP2 [44] (Великобритания), FRAMEworks [45] (США), Probabilistic Fire Simulator [46] (Финляндия), Fire Risk Evaluator [47] (Швеция), CESARE-RISK [3, 48] (Австралия), FIERA-System [49] и FiRECAM [4, 50] (Канада).

По-видимому, наиболее подробной в части детализации факторов, определяющих пожарный риск для зданий, на сегодняшний день является программа FiRECAM, разрабатываемая в Канаде в течение более десяти лет в сотрудничестве с австралийскими учеными [4]. Эта программа будет рассмотрена далее как пример реализации вероятностного метода анализа пожарного риска для зданий.

### 3.3. Программа FiRECAM

Программа FiRECAM позволяет оценивать два основных вида риска — риск для жизни находящихся в здании людей и ожидаемые материальные потери от пожара (тем самым удается избежать необходимости использовать стоимостное выражение человеческой жизни). На рис. 3 представлена совокупность включенных в FiRECAM моделей и взаимосвязи между ними [50, 51].





**Рис. 3. Структура программы FiRECAM для оценки пожарного риска в зданиях [50, 51]**  
(штриховой линией обведены модели, используемые для каждого сценария пожара)

Концепция, заложенная в FiRECAM, состоит в расчете возможных сценариев развития пожара, оценки опасности каждого сценария и оценки общего риска суммированием рисков отдельных сценариев (т. е. в точности по формуле (2)). Для определения вероятностей сценариев используются статистические данные, а при их отсутствии — экспертные оценки. Последствия каждого сценария описываются совокупностью детерминистских моделей: 1) развития пожара, 2) распространения дыма, 3) эвакуации людей из здания, 4) реагирования пожарных подразделений, 5) оценки числа погибших, 6) оценки материального ущерба. В левой колонке на рис. 3 представлены модели, расчет по которым производится однократно для заданного объекта (оценка характеристик здания, огнестойкости преград, времени реагирования пожарных

подразделений, экономические аспекты для оценки возможных материальных потерь). В правой колонке на рис. 3 представлена совокупность моделей, расчеты по которым проводятся для каждого сценария пожара, т. е. многократно для заданного объекта (обведены штриховой линией).

Рассматриваемые сценарии включают три возможных вида пожара в помещении, где произошло загорание: 1) тлеющий пожар, 2) пожар, не приводящий к объемной вспышке, 3) пожар, сопровождающийся объемной вспышкой. Для каждого вида пожара рассматривается возможность того, что дверь из помещения будет открыта или закрыта, так что в совокупности это дает шесть видов рассчитываемых пожаров, вероятность реализации каждого из которых оценивается из статистики. Так, в работе [50] приводятся данные о том, что

для Канады, согласно статистическим исследованиям, для пожаров в офисных зданиях доля тлеющих пожаров составляет 22%, объемная вспышка происходит в 24% случаев, тогда как в 54% случаев пожар происходит в режиме пламенного горения без объемной вспышки. Для каждого вида пожара модель развития позволяет определить зависимость от времени скорости тепловыделения, температуру в помещении и скорость образования токсичных компонент дыма ( $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ), а также основные времена, характеризующие появление первых признаков пожара, срабатывание системы сигнализации или активации спринклеров, время наступления объемной вспышки и время полного выгорания пожарной нагрузки. Эти данные являются входными для моделей распространения дыма и эвакуации, а также для модели распространения пожара.

Таким образом, в программе FiRECAM рассчитывается нестационарное развитие опасной ситуации, включающее развитие пожара и его опасностей, поведение людей, активную роль пожарных подразделений и т. д. Большое количество используемых взаимосвязанных моделей (см. рис. 3) приводит к тому, что верификация каждой из них приобретает первостепенное значение. Эта задача является весьма сложной, особенно при использовании натуральных испытаний [52], требующих значительных ресурсов. Поэтому процесс превращения исследовательской программы в практический инструмент является длительным. Неслучайно в статье [53] прямо говорится о том, что до полной верификации всех моделей программа FiRECAM позволяет рассчитывать лишь относительный риск, т. е. сравнивать риск какого-либо проектного решения с базовым вариантом. Примеры таких расчетов [53] включают сравнение риска для жизни людей в здании в случае установки спринклерной системы и системы пожарной сигнализации при различных показателях надежности этих систем. В то же время авторы в 2000 г. считали, что она еще не может быть использована для оценки абсолютного риска [53], и до настоящего времени во всех публикациях по программе FiRECAM приведены лишь относительные риски [4].

Данный пример наглядно иллюстрирует, насколько трудной в практическом исполнении является задача количественной оценки пожарного риска с учетом современного состояния пожарной

науки не только у нас в стране, но и в мире. Расчеты абсолютных рисков на основе вероятностного анализа, вследствие своей трудоемкости, возможны лишь для отдельных зданий и сооружений, и надежность получаемых результатов на данном этапе не всегда может быть адекватно оценена.

## 4. Эвристический подход к анализу риска

### 4.1. Основные положения.

#### Индексирование пожарного риска

В условиях, когда строгий количественный анализ риска на основе вероятностных методов оказывается затруднительным или невозможным вследствие недостаточности статистических данных, отсутствия или неудовлетворительной точности математических моделей, большое значение приобретают методы, реализующие эвристический подход. В данном подходе существенную роль играет экспертное оценивание, при помощи которого определяются субъективные вероятности событий и формируется набор факторов, определяющих пожарную опасность объекта и степень его защиты [23]. Выбранные факторы оцениваются в некоторых внутренних единицах (баллах) с последующим выведением итоговой оценки (индекса пожарной опасности) и ее интерпретацией с точки зрения достаточности пожарной безопасности объекта. Ниже рассматриваются общие черты и примеры конкретных методов индексации пожарного риска, реализующих эвристический подход.

Индексные, или балльные, методы (в зарубежной литературе — *fire risk indexing, point schemes, scoring methods* [2, 8, 54]; к сожалению, в отечественной литературе, вследствие неверного перевода термина «point schemes», методы выставления баллов иногда именуется точечными схемами [55—57]), первоначально получили распространение в области страхования как средство оценки риска для установления величины страховых взносов. Аналогичные по своей сути методы используются в самых разнообразных областях (например, в медицине), когда на основании неполной и неоднородной информации требуется принятие решения. Общий принцип, лежащий в основе индексных методов, состоит в выделении определенного числа факторов,

характеризующих состояние системы (при этом факторы могут быть весьма различными, в том числе не поддающимися прямому сравнению). Каждому фактору (атрибуту) системы по установленным правилам приписывается определенное число баллов, т. е. производится оценка состояния системы с различных точек зрения. Полученные баллы затем обрабатываются, в результате чего выводится окончательный показатель, или индекс, характеризующий общее состояние системы. Наиболее распространенными способами получения окончательного индекса являются суммирование баллов по всем атрибутам с весовыми коэффициентами, определяющими относительную важность каждого атрибута, либо перемножение баллов, возведенных в соответствующие степени [2, 8, 54].

Индексные методы, разработанные для оценки пожарной опасности, в качестве атрибутов, как правило, рассматривают факторы, способствующие возникновению и развитию пожара (пожарную нагрузку, источники зажигания и т. д.), а также факторы, снижающие пожарную опасность (наличие средств пожаротушения, огнестойкость конструкции, наличие сигнализации и путей эвакуации и т. д.). Итоговый показатель (индекс пожарного риска) выражает степень пожарной опасности объекта в некоторых условных единицах. На его основе можно сравнивать пожарную опасность двух объектов либо судить об эффективности внедрения противопожарных мероприятий на заданном объекте.

К настоящему времени в мире созданы и широко используются многочисленные индексные методы оценки пожарного риска (см. обзор в [2, 8, 54, 55]). Их разнообразие во многом объясняется тем, что разрабатывались они как методы оценки пожарного риска конкретных типов объектов или производств. Поэтому и наборы атрибутов, характеризующих пожарную опасность, и методы обработки проставленных баллов весьма различаются между собой. Ниже приведены примеры нескольких индексных методов, применяемых в различных областях для оценки пожаровзрывоопасности. Для каждого метода кратко рассмотрены используемые атрибуты, диапазоны значений, которые они могут принимать в зависимости от состояния объекта, способ выведения окончательной оценки и ее интерпретации.

#### 4.2. Метод «Дау Кемикал»

Примером «специализированного» индексного метода может служить индекс пожаровзрывоопасности, разработанный химической компанией «Дау Кемикал» (США) [58] и предназначенный для оценки рисков, связанных с хранением и использованием пожаровзрывоопасных материалов на предприятиях химической промышленности. В этом методе выделяются определенные производственные участки (например, реакторы, смесители, камеры сгорания, хранилища опасных веществ и т. п.), для каждого из которых определяется фактор опасности материала, характеризующий интенсивность энерговыделения при возгорании и оцениваемый в баллах в диапазоне от 1 до 40. Затем оценивается фактор опасности для данного участка, зависящий от ряда показателей, которые приведены в таблице и разделены на два класса. Первый класс включает показатели, которые могут усиливать или ослаблять тяжесть последствий пожара (возможность протекания экзотермических и эндотермических реакций, находится ли участок в помещении, есть ли системы обнаружения утечек и дренирования и др.), второй — показатели, влияющие на вероятность возникновения пожара или взрыва (наличие аппаратов высокого или низкого давления, коррозия оборудования, наличие нагревательных приборов и др.). После заполнения таблицы показатели каждого класса суммируются и результаты перемножаются (что на качественном уровне соответствует определению риска как произведения вероятности и ущерба), в результате получается фактор опасности, заключенный в пределах от 1 до 8. Окончательный индекс пожаровзрывоопасности FEI (*Fire and Explosion Index*) вычисляется как произведение фактора материала и фактора опасности. Отдельно оцениваются факторы, способствующие снижению опасности (контроль за процессами, изоляция материалов, противопожарная защита). На основе полученных данных оценивается масштаб возможных последствий пожара или взрыва, включая размеры зоны, возможных разрушений, максимально возможный и наиболее вероятный материальный ущерб. Опыт показал, что индекс пожаровзрывоопасности FEI представляет собой чрезвычайно полезный инструмент анализа, получаемая при его помощи

информация позволяет определить относительный риск различных производственных участков, причем результаты анализа востребованы как инженерами, так и управляющим персоналом. В настоящее время использование индекса FEI является обязательным в Нидерландах, что закреплено соответствующим законом [54].

### 4.3. Метод FSES

Другим примером индексного метода может служить система оценки пожаробезопасности FSES (*Fire Safety Evaluation System*) [59], которая была разработана для оценки соответствия уровня пожарной безопасности людей требованиям нормативного документа [60]. Данный индексный метод предназначен в первую очередь для учреждений здравоохранения, что нашло отражение в выборе атрибутов, по которым оценивается риск. Все здание разбивается на зоны, отделенные этажными перекрытиями, пожарными преградами или дымовыми барьерами. Для каждой зоны фактор риска оценивается по пяти категориям: 1) мобильность пациентов (в отсутствие лиц с ограниченной подвижностью соответствующий фактор равен единице, тогда как ограничения подвижности пациентов различной степени приводят к возрастанию этого фактора до 4,5); 2) плотность размещения пациентов (фактор устанавливается в пределах от 1 до 2); 3) расположение зоны (фактор находится в пределах от 1,1 для первого этажа до 1,6 для этажей выше шестого и подвальных помещений); 4) соотношение числа пациентов и персонала (1,0, если на одного члена персонала приходится 1—2 пациента, до 4,0, если пациенты находятся без постоянно присутствующего персонала); 5) возраст пациентов (1,0 для возраста от 1 до 65 лет, 1,2 в противном случае). Общий фактор риска для находящихся в данной зоне вычисляется как произведение коэффициентов по указанным пяти категориям. Затем по тринадцати категориям оцениваются меры пожарной безопасности, снижающие риск (учитывается горючесть конструкции, пожароопасность отделочных материалов, пожаростойкость дверей, наличие дымовых преград, средств пожарной сигнализации, ручного и автоматического оповещения, количество путей эвакуации и др.). Начисленные по каждой категории баллы затем суммируются, и полученный результат

сравнивается с определенной ранее величиной относительного пожарного риска. Кроме того, производится выборочное суммирование баллов и определяются уровни безопасности с точки зрения трех стратегий — ограничения распространения пожара, его тушения и эвакуации людей. Считается, что пожарная безопасность людей в данной зоне соответствует требованиям [60], если по каждой стратегии набраны баллы не ниже установленных уровней, а общий балл мер пожарной безопасности больше, чем фактор пожарного риска.

Индексный метод [59] в дальнейшем был распространен на другие типы объектов, в частности на офисные здания. Кроме того, он послужил основой для развития нескольких специализированных индексных систем, например для исторических зданий (см. обзор в [2, 54]).

Отметим, что в нашей стране также развивались подобные методы индексирования пожарного риска — например, методика оценки пожарной безопасности особо ценных объектов культурного наследия [56]. В этой методике уровень пожарной безопасности музеев  $Y$  определяется суммированием оценок пожарной безопасности по всем зданиям музея  $Y_i$ , которые, в свою очередь, находятся как сумма по 39 показателям:  $Y_i = \sum \alpha_j \varphi_j^i$ , где  $\varphi_j^i$  — функции факторов, влияющих на уровень пожарной безопасности музеев,  $\alpha_j$  — постоянные весовые коэффициенты, различающиеся по группам музеев. Полученные по этой методике значения уровней пожарной безопасности нескольких особо ценных объектов сравнивались между собой, кроме того, методика позволяет выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на уровень пожарной безопасности объекта.

### 4.4. Метод FRIM

В скандинавских странах распространение получил индексный метод оценки риска FRIM (*Fire Risk Index Method*) [61, 62], разработанный в университете г. Лунд (Швеция). Создание метода было продиктовано тем, что с приходом гибкого нормирования и развитием современных средств противопожарной защиты открылись широкие возможности использования древесины в качестве материала для несущих конструкций многоэтажных зданий. Метод FRIM разрабатывался как средство обоснования

противопожарной защищенности таких зданий путем сравнения индекса пожарного риска с аналогичным индексом для зданий с негорючими несущими конструкциями. Этот метод по сути является методом оценки пожарной опасности, а не риска, потому что в нем не учитывается вероятность загорания. В разработке метода участвовали эксперты четырех скандинавских стран, первая версия метода тестировалась путем сравнения индексных оценок для четырех многоэтажных зданий с результатами стандартного количественного анализа риска на основе анализа логических деревьев событий [61].

В методе FRIM версии 2.0 [62] уровень противопожарной безопасности определяется по 17 показателям  $P_p$ , каждый из которых оценивается по пятибалльной шкале, причем для некоторых показателей баллы определяются суммированием с весами оценок по нескольким подпараметрам (также оцениваемым по пятибалльной шкале). Основные показатели  $P_i$  относятся к следующим категориям (для каждой категории ниже приведены случаи наивысшего и наинизшего баллов): 1) внутренние отделочные материалы (бетон, камень — 0 баллов, пластик — 5 баллов); 2) система пожаротушения (наличие переносных средств и автоматических спринклерных установок — 5 баллов, полное отсутствие — 0 баллов); 3) пожарная служба, определяется как средневзвешенное по трем подпараметрам — оснащенности пожарного расчета (при наличии средств пожаротушения, дымоудаления и спасательных лестниц — 5 баллов, при отсутствии пожарной части — 0 баллов), времени реагирования (до 5 минут — 5 баллов, свыше 20 мин. — 0 баллов) и доступности здания для тушения (доступ ко всем окнам по пожарным лестницам — 5 баллов, доступно менее чем одно окно на помещение — 0 баллов); 4) максимальная площадь противопожарных отсеков (менее 50 м<sup>2</sup> — 5 баллов, более 400 м<sup>2</sup> — 0 баллов); 5) конструкция, определяется взвешенной суммой по четырем подпараметрам — огнестойкости (более 60 мин. — 5 баллов, менее 15 мин. — 0 баллов), наличия огнепреградителей (сплошная конструкция — 5 баллов, деревянная конструкция с пустотами и без огнепреградителей — 0 баллов), проемы (без проемов — 5 баллов, незащищенные проемы — 0 баллов) и горючесть (негорючая конструкция и перегородки — 5 баллов, горючая конструкция и перегородки — 0 баллов); 6) огнестойкость дверей, определяется взвешенной суммой двух подпараметров — дверей, ведущих к путям эвакуации, и дверей на путях эвакуации (каждый подпараметр оценивается в 5 баллов при огнестойкости более 60 мин. и 0 баллов при огнестойкости менее 15 мин.); 7) окна (при вертикальном расстоянии между окнами более высоты окна и огнестойкости более 15 мин. — 5 баллов, при вертикальном расстоянии менее высоты окна и огнестойкости менее 15 мин. — 0 баллов); 8) фасады, определяется тремя подпараметрами — долей горючей части (0% — 5 баллов, >40% — 0 баллов), наличием горючих материалов над окнами (нет — 5 баллов, да — 0 баллов) и наличием пустот в пространстве между стеной и фасадом (нет — 5 баллов, сплошная пустотность — 0 баллов); 9) чердаки (конструктивное ограничение распространения огня на чердак и противопожарные перегородки на чердаке — 5 баллов, их отсутствие — 0 баллов); 10) расстояние до соседних зданий (более 20 м — 5 баллов, менее 6 м — 0 баллов); 11) система противодымной защиты (автоматическое включение, подпор и вытяжка — 5 баллов, отсутствие — 0 баллов); 12) система обнаружения (достаточное число детекторов и их высокая надежность — 5 баллов, отсутствие — 0 баллов); 13) система оповещения (звуковой и световой сигнал, оповещение по всему зданию — 5 баллов, отсутствие — 0 баллов); 14) пути эвакуации, определяется по четырем подпараметрам — типу эвакуационного пути (лестница, балкон или окно), длине эвакуационного пути и числу этажей, наличию указателей и их подсветке, горючести материала (каждый из подпараметров определяется по таблице в диапазоне от 5 (наилучший случай, взаимное дублирование) до 0 (отсутствие) баллов); 15) несущая конструкция, характеризуется двумя подпараметрами — огнестойкостью (более 90 мин. — 5 баллов, менее 30 мин. — 0 баллов) и горючестью (негорючие несущие элементы и отделка — 5 баллов, горючие — 0 баллов); 16) проверка и обслуживание системы пожарной безопасности, определяется тремя подпараметрами — обслуживанием (дважды в год — 5 баллов, реже, чем раз в три года — 0 баллов), инспектирование путей эвакуации (раз в месяц — 5 баллов, реже, чем раз в три года — 0 баллов) и информированность людей (письменная информация и учебные тревоги — 5 баллов, отсутствие — 0 баллов);

17) предотвращение распространения дыма по вентиляционной системе (автономная система вентиляции для каждого помещения — 5 баллов, распространение дыма не предотвращается — 0 баллов).

После определения численных значений всех параметров  $P_1 — P_{17}$  производится их суммирование с весами, в результате выводится окончательный балл, характеризующий противопожарную безопасность. Индекс риска определяется вычитанием этого балла из максимального значения, равного 5. Полученный таким образом индекс риска может использоваться для сравнения уровня пожарной безопасности различных объектов, например, здания с несущими элементами из древесины и бетона. Пример ранжирования зданий по уровню пожарной опасности на основе индекса риска можно найти в [61], где показано, что метод FRIM дает результаты, полностью согласующиеся с результатами вероятностного анализа риска, проведенного независимо на основе деревьев событий.

#### 4.5. Метод Гретенера и его модификации

В европейских странах широкое распространение получили методы индексной оценки пожарного риска, в основе которых лежит подход, разработанный в Швейцарии М. Гретенером [63, 64] (в переводе на русский язык весьма подробное изложение исходного метода можно найти в обзоре [65]). Метод Гретенера первоначально создавался для применения в страховом деле с целью определения величины страховых взносов в зависимости от существующих пожарных рисков. В 1984 г в Швейцарии был принят документ SIA 81 [66], в котором изложена переработанная версия метода Гретенера (перевод и адаптация этой методики к российским нормативным документам имеются в работе [67]). Последняя версия методики выпущена в свет Ассоциацией кантональных страховых компаний в области пожарной безопасности (VKF/AEAI) в 2007 г. [68]. Пожарный риск в [63—68] рассматривается с точки зрения опасности для имущества (материальный риск). Модификации метода Гретенера с учетом накопленного опыта и особенностей национального законодательства используются также в Австрии [69], Португалии, Испании, Франции [70], Бельгии [71].

Основу метода Гретенера составляет оценка вероятности возникновения пожара (фактора инициации)  $A$  и ожидаемого ущерба  $B$  в некоторых эмпирически выбранных единицах, после чего пожарный риск определяется как произведение этих величин (что соответствует общепринятому в вероятностных методах определению риска). Ожидаемый ущерб  $B$  вычисляется как отношение потенциальной пожарной опасности  $P$  и фактора пожарной защиты, учитывающего наличие нормативных мероприятий  $N$ , специальных мероприятий  $S$  и огнестойкость сооружения  $F$ . Таким образом, пожарный риск определяется как

$$R = A \cdot B = \frac{A \cdot P}{N \cdot S \cdot F}. \quad (3)$$

Фактически в методе Гретенера пожарный риск  $R$  является мерой баланса между вероятностью возникновения пожара, потенциальным ущербом и защитными мероприятиями. Объект считается защищенным достаточно, если риск не превосходит некоторого установленного значения, в противном случае имеющиеся защитные мероприятия недостаточны и требуется их усиление.

Имеющиеся на данный момент модификации метода Гретенера отличаются деталями вычисления входящих в формулу (3) сомножителей. В отличие от формулы (3), которая была введена в более поздних модификациях, в исходном варианте [63—65] рассчитывается уровень пожароопасности  $B$ , который затем сравнивается с максимально допустимым уровнем  $B_{\max}$ , при этом фактор инициации  $A$  не входит в виде сомножителя, а влияет на величину максимально допустимого уровня пожарной опасности  $B_{\max}$ . Факторы  $P$ ,  $N$ ,  $S$  и  $F$  вычисляются в виде произведения набора подфакторов, каждый из которых характеризует определенный аспект пожарной опасности или противопожарной защиты.

Чтобы получить представление о структуре расчетных формул, рассмотрим более подробно вариант метода [66, 67]. Фактор потенциальной опасности  $P$  имеет вид

$$P = q \cdot i \cdot e \cdot g \cdot r \cdot k, \quad (4)$$

где:  $q$  — фактор подвижной пожарной нагрузки — фактор неподвижной пожарной нагрузки,

зависящий от горючести несущей конструкции (с одной стороны) и материала фасада и крыши (с другой стороны);  $c$  — фактор горючести, зависящий от одной из шести категорий горючести материала (от взрывоопасной до негорючей);  $e$  — фактор этажности (зависящий от высоты помещения над уровнем земли или глубины для подвальных этажей),  $g$  — фактор площади и формы помещения (учитывающий соотношение длины и ширины помещения и его площадь),  $r$  — фактор дымообразующей способности,  $k$  — фактор токсичности дыма. Методика [66, 67] снабжена большим количеством таблиц, позволяющих определить значения факторов (4) для широкого набора помещений различного типа и предназначения.

Фактор инициации  $A$  в формуле (3) отражает вероятность возникновения пожара в зависимости от назначения помещения. Величина  $A$  изменяется в пределах от 0,85 (небольшая вероятность, например музеи) до 1,80 (очень большая вероятность, например производство самовозгорающихся материалов).

Фактор нормативных защитных мероприятий  $N$  рассчитывается как произведение понижающих коэффициентов при отсутствии либо недостаточности какого-либо мероприятия (ручные огнетушители, внутренние пожарные гидранты, надежность водоснабжения при пожаротушении, длина рукавной линии от гидранта до входа в здание, наличие прошедших инструктаж сотрудников).

Фактор специальных мероприятий  $S$  рассчитывается как произведение повышающих коэффициентов по шести категориям (обнаружение пожара, передача сигнала пожарной тревоги, оснащенность службы пожаротушения, время прибытия подразделений пожарной охраны на объект, наличие установок пожаротушения и противодымной защиты).

Наконец, фактор огнестойкости  $F$  представлен в виде произведения четырех коэффициентов, характеризующих огнестойкость несущей конструкции, внешних стен, потолков и перекрытий, пожарных участков в зависимости от площади участков и площади проемов.

Вычисленный по формуле (3) уровень пожарного риска сравнивается с предельно допустимым риском  $R_{\max} = 1,3 \cdot K_p$ , где  $K_p$  — понижающий коэффициент, учитывающий повышенную угрозу для

людей в зданиях с массовым пребыванием людей и местах с затрудненной эвакуацией.

В выпущенной в 2007 году версии метода [68] отмечается, что расчетные методы, создававшиеся в 60-х годах, к настоящему времени во многом устарели, поскольку в них в качестве базовых параметров помещения использовалась площадь противопожарного отсека в 1200 м<sup>2</sup> при средней пожарной нагрузке в 500—1000 МДж/м<sup>2</sup>. В 2003 г. в Швейцарии были приняты более либеральные нормативы, согласно которым обоснование пожарной безопасности на основе анализа риска обязательно лишь при площади помещения свыше 2400 м<sup>2</sup> (за исключением многоэтажных строений со сгораемыми элементами, для которых по-прежнему такое обоснование необходимо при площади более 1200 м<sup>2</sup>). Кроме того, повсеместное распространение новых материалов привело к тому, что таблицы пожарных нагрузок и горючести для различных типов зданий также устарели. Обновленный метод расчета пожарного риска [68] применим к оценке пожарной опасности промышленных зданий, мастерских и кустарных производств, а также офисных зданий. В преамбуле явно указано, что методика [68] не применима для супермаркетов, отелей, больниц, зданий с массовым пребыванием людей, а также производств пожаро-взрывоопасных веществ и материалов.

Обновленный метод [68] значительно упрощен по сравнению как с исходным методом Гретенера [63—65], так и его версией SIA 81 [66, 67], хотя суть его осталась той же. Методика [68] сопровождается пересмотренными таблицами, в которых приведены типичные значения пожарной нагрузки и факторов. Вычисленное значение пожарного риска  $R_e$  сравнивается с приемлемым уровнем риска  $R_a$ , для чего вычисляется «коэффициент пожарной безопасности»  $\gamma = R_a/R_e$ . Пожарная безопасность считается обеспеченной при  $\gamma \geq 1$ . Документ [68] не дает рекомендаций по определению приемлемого уровня риска  $R_a$ , хотя, судя по приведенным примерам использования методики,  $R_a = 1,0$ .

Во Франции был создан свой вариант индексного метода оценки пожарного риска ERIC (*Evaluation du Risque Incendie par le Calcul*) [70], в основе которого лежит формула, аналогичная (3): пожарный риск  $R = P/M$  вычисляется как отношение факторов потенциальной пожарной опасности  $P$  и защитных

мероприятий  $M$ . Один из множителей, входящих в фактор  $P$ , учитывает вероятность загорания.

Важным аспектом метода ERIC по сравнению с [63—68] является то, что отдельно рассматривается пожарная опасность для людей,  $R_1 = P_1/M_1$ , и для имущества,  $R_2 = P_2/M_2$ . Следует отметить, что, несмотря на схожесть подходов, в методе ERIC для вычисления факторов опасности и защитных мероприятий используются существенно отличающиеся соотношения, таблицы и т. д.

В работе [70] приведены примеры использования метода ERIC для оценки пожарной опасности четырех объектов — торгового центра, больницы, школы, промышленного здания, при этом для каждого объекта рассмотрено несколько видов защитных мероприятий. Результаты расчетов представлены точками на плоскости ( $R_1, R_2$ ), что позволяет наглядно видеть изменение риска для людей и имущества при введении дополнительных мер противопожарной защиты. Так, для торгового центра (площадь 20 000 м<sup>2</sup>, вместимость 6000 человек) при наличии гидранта общественного пользования, обнаружении пожара людьми, ручной подаче пожарной тревоги и при наличии огнетушителей уровни пожарной опасности составляют  $R_1 = 1,31$  (для людей) и  $R_2 = 4,52$  (для имущества). При установке спринклеров и системы принудительного дымоудаления эти значения снижаются до  $R_1 = 0,45$  и  $R_2 = 1,67$  соответственно. К сожалению, вопрос о том, какие уровни пожарного риска являются приемлемыми, в [70] не решен. Сказано лишь, что такие уровни должны быть установлены, что позволит находить решения, обеспечивающие необходимую степень защищенности людей и имущества. Поэтому метод в первую очередь пригоден для получения относительных оценок и сравнения однотипных объектов по степени пожарного риска.

Наконец, рассмотрим метод FRAME (*Fire Risk Assessment Method for Engineering*), основанный на методе Гретенера и активно развиваемый в Бельгии на протяжении более чем 30 лет [71]. От вариантов метода Гретенера, рассмотренных выше, FRAME выгодно отличается, во-первых, охватом более широкого спектра опасностей, связанных с пожарами. Именно, пожарный риск оценивается с трех точек зрения — прямой материальный риск (уничтожение имущества), риск для людей и риск косвенных

экономических потерь (остановка производства). Во-вторых, при создании FRAME на основе логических деревьев событий и отказов были проанализированы причинно-следственные связи между событиями, возможными при пожаре, что нашло отражение в используемых расчетных формулах. В-третьих, для оценки самих факторов используются аналитические формулы, избавляющие от «ступенчатости» параметров, характерной при использовании таблиц.

В методе FRAME [71] используются следующие формулы для расчета риска материальных потерь  $R$ , риска для людей  $R_1$  и риска косвенных потерь  $R_2$ :

$$R = \frac{P}{A \cdot D}, \quad P = q \cdot i \cdot g \cdot e \cdot v \cdot z, \\ A = 1,6 - a - t - c, \quad D = W \cdot N \cdot S \cdot F. \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{P_1}{A_1 \cdot D_1}, \quad P_1 = q \cdot i \cdot e \cdot v \cdot z, \\ A_1 = 1,6 - a - t - r, \quad D_1 = N \cdot U. \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{P_2}{A_2 \cdot D_2}, \quad P_2 = i \cdot g \cdot e \cdot v \cdot z, \\ A_2 = 1,6 - a - c - d, \quad D_2 = W \cdot N \cdot S \cdot Y. \quad (7)$$

В формулах (5)—(7)  $P$  представляет собой потенциальный риск,  $A$  — приемлемый риск,  $D$  характеризует защитные мероприятия. Таким образом, в отличие от рассмотренных выше модификаций метода Гретенера, во FRAME рассматривается относительный риск, и значение  $R = 1$  означает, что пожарный риск соответствует приемлемому уровню. Формулы (5)—(7) по сути своей близки к аналогичным формулам в других модификациях метода Гретенера (см. (3), однако состав входящих в них факторов и способ их вычисления во многом отличаются.

Не вдаваясь в подробности, перечислим входящие в (5)—(7) факторы, что даст возможность получить представление об учитываемых явлениях и характеристиках пожара. Итак,  $q$  — фактор полной пожарной нагрузки,  $i$  — фактор распространения пламени, определяемый с учетом среднего размера горючего материала  $m$  (отношения объема к площади поверхности), температуры термической деструкции поверхности  $T$  и класса горючести  $M$  (по классификации стандартов EN 13501-1



и EN 12845). В определенном смысле, фактор  $i$  является аналогом фактора горючести  $c$  в формуле (4), но включает в себя физически значимые свойства материала.

Фактор вентиляции  $v$  учитывает возможность накопления горячих продуктов сгорания в помещении, что способствует объемной вспышке и переходу пожара в развитую стадию. Величина  $v$  зависит от подвижной пожарной нагрузки  $Q_m$ , она уменьшается с увеличением высоты помещения  $h$  и отношения площади вентиляционных отверстий к площади пола помещения  $k$ . Геометрия помещения учитывается факторами этажности  $e$  и формы помещения  $g$ , используемыми в большинстве модификаций метода Гретенера (см. выше), однако вместо таблиц для них предложены аналитические выражения. Наконец, новой величиной в (5)—(7) является фактор доступности помещения для пожарного расчета  $z$ , зависящий от высоты (глубины) помещения и числа направлений, с которых возможен доступ в помещение.

Определение приемлемого риска  $A$  в (5)—(7) во многом аналогично исходному методу Гретенера: условное значение  $A_0 = 1,6$  определяет базовый уровень допустимого риска, который уменьшается за счет фактора инициации загорания  $a$ , фактора времени эвакуации  $t$  и фактора окружающей обстановки  $r$ , который показывает, насколько быстро распространяется пожар и накапливается дым.

Материальные риски (прямой и косвенный) зависят от того, насколько ценным является содержимое здания, что учитывается введением фактора  $c$ , характеризующего трудность восстановления содержимого и его стоимость в денежном выражении. Наконец, фактор зависимости  $d$  оценивает, насколько серьезным является влияние пожара на функционирование здания с точки зрения прерывания производственного процесса.

Фактор огнестойкости  $F$  вычисляется по аналитической формуле как функция среднего предела огнестойкости  $f$  и фактора специальных защитных мероприятий  $S$ . Защитные мероприятия в (5)—(7) включают факторы, характеризующие систему водоснабжения  $W$ , нормативные мероприятия  $N$ , специальные мероприятия  $S$ , мероприятия, способствующие эвакуации  $U$  и сохранности имущества  $Y$ .

Таким образом, в методе FRAME на основе оценки совокупности определяющих параметров и вычисления факторов потенциальной опасности, допустимого риска и защитных мероприятий, по формулам (5)—(7) определяется три уровня риска: материальный риск  $R$ , риск для людей  $R_1$  и риск косвенных материальных потерь  $R_2$ . Как отмечалось выше, в методе FRAME определяется относительный риск, поэтому пожаробезопасность с каждой из трех точек зрения считается обеспеченной, если соответствующий относительный риск не превышает единицы. В работе [71] указывается, что риск рассматривается в логарифмических единицах и дается следующая связь между величиной  $R$  и ожидаемым ущербом: при  $R < 1$  в случае пожара можно ожидать уничтожения не более 10% оцениваемого помещения, при  $1,0 < R < 1,3$  — от 10 до 20%, при  $1,3 < R < 1,5$  — от 20 до 30%, при  $1,5 < R < 1,7$  — от 30 до 50%, при  $1,7 < R < 1,9$  — от 50 до 80%, при  $R > 1,9$  — от 80 до 100%.

Метод FRAME реализован в виде компьютерной программы, позволяющей ввести все необходимые данные и рассчитать риски для базового набора данных (например, характеризующего текущее состояние объекта) и двух альтернативных вариантов, что позволяет в наглядном виде оценить воздействие тех или иных факторов на риск для имущества и людей. Это существенно облегчает его использование по сравнению с заполнением бланков, характерным для методов [63—68].

## 5. Заключение

Выполненный обзор современных методов анализа пожарных рисков однозначно свидетельствует о том, что и вероятностные, и индексные методы являются весьма мощными инструментами, каждый из которых занимает собственное место в спектре возможных подходов к проблеме количественной оценки риска. Вероятностные методы требуют проведения весьма трудоемкого и детального анализа с привлечением соответствующего математического аппарата и программных средств. Их применение для расчета пожарного риска в зданиях представляет значительные трудности из-за необходимости проводить расчеты развития пожара и эвакуации людей на основе дифференциальных моделей для многих сценариев. Индексные ме-

тоды, реализующие эвристический подход к оценке риска, наоборот, позволяют оценивать уровень пожарной опасности и риска с минимальными вычислительными затратами, однако успешность их использования кардинальным образом зависит от правильности балльной оценки различных факторов и интерпретации результата. Для максимально эффективного использования различных методов необходимо четко представлять их область применимости, а также сильные и слабые стороны. Эти вопросы более подробно рассматриваются во второй части данной работы.

## Литература

1. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Собрание законодательства Российской Федерации, 2008, № 30 (часть I), ст. 3579.
2. Rasbash, D., Ramachandran, G., Kandola, B., Watts, J., Law, M. (2004). *Evaluation of Fire Safety*. — N.Y.: J. Wiley & Sons.
3. Hasofer, A. M., Beck, V. R., Bennetts, I. D. (2007). *Risk Assessment in Building Fire Safety Engineering*. — Oxford: Butterworth-Heinemann.
4. Yung, D. (2008). *Principles of Fire Risk Assessment in Buildings*. — N.Y.: J. Wiley & Sons.
5. Meacham, B. J. (2008). A Risk-Informed Performance-Based Approach to Building Regulation. 7th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, pp. 1—13.
6. Молчанов В. П., Болодьян И. А., Дешевых Ю. И. и др. (2001). Концепция объектно-ориентированного нормирования промышленных предприятий по пожарной безопасности. — *Пожарная безопасность*, № 4, с. 94—106.
7. Hall, J. R. (2006). Overview of Standards for Fire Risk Assessment. *Fire Science and Technology*, 25, pp. 55—62.
8. Hall, J. R., Watts, J. M. (2008). Fire Risk Analysis. In: *Fire Protection Handbook*, Cote, A. E. (ed.), NFPA, Ch. 8, pp. 3—135 — 3—143.
9. NFPA 551. (2007). *Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments*. National Fire Protection Association.
10. ISO TS 16732. (2005). *Fire Safety Engineering — Guidance on Fire Risk Assessment*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
11. PD-7974-7:2003. *Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings — Part 7: Probabilistic Risk Assessment*. — British Standards Institution.
12. PAS 79. (2007). *Fire risk assessment — Guidance and a Recommended Methodology*. — British Standards Institution.
13. SFPE Engineering Guide to Application of Risk Assessment in Fire Protection Design. (2006). — Bethesda, MD: Society of Fire Protection Engineers.
14. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. (2002). Section 5, Fire Risk Analysis. — Quincy, MA: National Fire Protection Association.
15. *International Fire Engineering Guidelines*. (2005). — Australian Building Codes Board.
16. ГОСТ 12.1.004-91\*. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
17. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
18. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. (2009). — М., МЧС России.
19. ГОСТ Р 51901.1-2002 (МЭК 60300-3-9:1995) Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.
20. ГОСТ Р 51901.4-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению при проектировании.
21. ГОСТ Р 51901.13-2005 (МЭК 61025:1990) Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей.
22. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М. и др. (2002). Надежность технических систем и техногенный риск. — М.: «Деловой экспресс».
23. Акимов В. А., Лесных В. В., Радаев Н. Н. (2004). Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. — М.: «Деловой экспресс».
24. *Пожарные риски*. Вып. 1. Основные понятия (2004). Под ред. Н. Н. Брушлинского. — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России.
25. Анализ риска и проблемы безопасности. Ч. 1. Основы анализа и регулирования безопасности (2006). Под ред. К. В. Фролова. — М.: МГФ «Знание».
26. Meacham, B. J. (2004). Understanding Risk: Quantification, Perceptions, and Characterization. *Journal of Fire Protection Engineering*, 14, pp. 199—227.
27. Hurley, M. J., Bukowski, R. W. (2008). Fire Hazard Analysis Techniques. In: *Fire Protection Handbook*. Cote, A. E. (ed.). — NFPA, Ch. 7, pp. 3—121 — 3—134.

28. Микеев, А. К. (1994). Пожар. Социальные, экономические, экологические проблемы. — М.: Пожнаука.
29. Ковалевич О. М. (2006). Риск в техногенной сфере. — М.: Изд. дом МЭИ.
30. Хентли, Э. Дж., Куаммото, Х. (1984). Надежность технических систем и оценка риска. — М.: Машиностроение.
31. Kumamoto, H. (2007). Satisfying Safety Goals by Probabilistic Risk Assessment. — Berlin, Springer.
32. Маршалл В. (1989). Основные опасности химических производств. — М.: Мир.
33. AIChE/CCPS. (1989). Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Assessment. — New York: Amer. Inst. Chem. Engineers.
34. AIChE/CCPS. (1995). Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs. — New York: Amer. Inst. Chem. Engineers.
35. TNO. (1992). Methods for the Calculation of Physical Effects Resulting from Releases of Hazardous Materials (Liquids and Gases) — TNO «Yellow Book». 2<sup>nd</sup> Ed. — Voorburg, TNO.
36. РД 03-418-01. (2001). Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. — Госгортехнадзор России.
37. Брушлинский Н. Н., Есин В. М., Слуев В. И. и др. (2006). Пожарные риски. Вып. 4. Управление пожарными рисками. Под ред. Н. Н. Брушлинского и Ю. Н. Шебеко. — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России.
38. Шебеко Ю. Н., Малкин В. Л., Смолин И. М. и др. (1999). Методы оценки поражающих факторов крупных пожаров и взрывов на наружных технологических установках. Пожаровзрывобезопасность, Т. 8, № 4, с. 18—28.
39. Болодьян И. А., Шебеко Ю. Н., Карпов В. Л. и др. (2006). Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. — М.: ВНИИПО МЧС России.
40. Акимов В. А., Быков А. А., Востоков В. Ю. и др. (2007). Методические рекомендации по определению количества пострадавших при чрезвычайных ситуациях техногенного характера. Проблемы анализа риска. Т. 4, № 4, с. 347—367.
41. Шебеко Ю. Н., Гордиенко Д. М., Малкин В. Л. и др. (1999). Оценка индивидуального и социального риска пожаров и взрывов для многотопливной автозаправочной станции. Пожаровзрывобезопасность. Т. 8, № 6, с. 42—47.
42. Гордиенко Д. М. (2004). Исследование индивидуально-го риска пожаров и взрывов для традиционной автозаправочной станции. Пожарная безопасность, № 1, с. 107—112.
43. Холщевников В. В., Самошин Д. А. (2009). Эвакуация и поведение людей при пожарах. — М.: Академия ГПС МЧС России.
44. Fraser-Mitchell, J. N. (1994). Object-Oriented Simulation (Crisp II) for Fire Risk Assessment. In: Fire Safety Science — Proceedings of the Fourth International Symposium, IAFSS, pp. 793—804.
45. Clarke, F. B., Bukowski, R. W., Stiefel, S. W., Hall, J. R., Steele, S. A. (1990). FRAMEworks. Fire Risk Assessment Method: Final Report. Nat. Fire Protection Research Foundation.
46. Hostikka, S., Keski-Rahkonen, O., Korhonen, T. (2003). Probabilistic Fire Simulator. Theory and User's Manual for Version 1.2. VTT Building and Transport, Espoo. VTT Publications 503.
47. Johansson, H. (2004). Fire Risk Evaluator. Ett datorprogram för värdering av investeringar i brandskydd. Rapport 3130, Lund.
48. Zhao, L., Beck, V. (1997). The definition of scenarios for the CESARE-RISK model. In: Fire Safety Science — Proceedings of the Fifth International Symposium, IAFSS, pp. 655—666.
49. Bénichou, N., Kashef, A. H., Reid, I., Hadjisophocleous, G. V., Torvi, D. A., Morinville, G. (2005). FIERASystem: a fire risk assessment tool to evaluate fire safety in industrial buildings and large spaces. Journal of Fire Protection Engineering, 15, pp. 145—172.
50. Yung, D., Hadjisophocleous, G. V., Proulx, G. (1999). A description of the probabilistic and deterministic modelling used in FiRECAM<sup>TM</sup>. International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, 1, pp. 18—26.
51. Bénichou, N., Kashef, A. H. (2004). How to Use Fire Risk Assessment Tools to Evaluate Performance-Based Designs. CIB 2004 World Building Congress, pp. 1—11.
52. Beck, V. R., Yung, D., He, Y., Sumathipala, K. (1996). Experimental validation of a fire growth model. Proc. 7th Intl. Fire Conf., INTERFLAM'96, Franks, C. (ed.), Interscience Communications Ltd, London, pp. 653—662.
53. Yung, D., Bénichou, N. (2000). Consideration of reliability and performance of fire protection systems in FiRECAM<sup>TM</sup>. Proc. InFIRE Conference, Ottawa, pp. 1—11.
54. Watts, J. M. (2002). Fire Risk Indexing. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Ch. 10. Section 5, Fire Risk Analysis, pp. 5—125 — 5—142. — Quincy, MA: National Fire Protection Association.

55. Гаврилей В. М., Шевчук А. П., Матюшин А. В. и др. (1987). Методы количественной оценки уровня пожаровзрывоопасности объектов. — М.: Главный информационный центр МВД СССР. Обзорная информация, вып. 2/87.
56. Шевчук А. П., Присадков В. И. (1997). Количественная оценка пожарного риска. Юбилейный сборник трудов Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны. — М.: ВНИИПО МВД России, с. 259—269.
57. Корольченко, А. Я., Золотарев, А. О. (2008). Принципы расчета пожарного риска. Сб. трудов 7-й межд. спец. выставки «Пожарная безопасность XXI века». — М.: Эксподизайн-ПожКнига, с. 121—122.
58. Dow's Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide. 7<sup>th</sup> ed. (1994). — New York: Dow Chemical Company, American Institute of Chemical Engineers.
59. NFPA 101A, Alternative Approaches to Life Safety. (2001). — Quincy, MA: National Fire Protection Association.
60. NFPA 101, Life Safety Code. (2001). — Quincy, MA: National Fire Protection Association.
61. Hultquist, H., Karlsson, B. (2000). Evaluation of a Fire Risk Index Method for Multistorey Apartment Buildings. — Lund University, Sweden, Report No. 3088.
62. Karlsson, B. (2002). Fire Risk Index Method — Multi Storey Apartment Buildings. FRIM-MAB. Version 2.0. Träteknik, Rapport 0212053.
63. Gretener, M. (1968). Versuch zur rechnerischen Bestimmung der Brandgefährdung von Industrie- und Objekten. Internationales Brandschutzseminar; 3 [Kongress] (*Attempt to calculate the fire risk of industrial and other objects. Third International Fire Protection Symposium.*) Eindhoven, p. 34—38.
64. Evaluation of Fire Hazard and Determining Protective Measures (According to Method M. Gretener). (1973). Ed. by: Association of Cantonal Institutions for Fire Insurance, Fire Prevention Service for Industry and Trade. Edition 1973.
65. Обухов, Ф. В. (1975). Пожарная безопасность. — М.: Недра.
66. Fontana, M. (1984). Swiss Rapid Risk Assessment Method. Institute of Structural Engineering, SIA 81. — Zurich, Switzerland, ETH.
67. Осипова М. Н. (1998). Методическое пособие по оценке пожароопасности помещений различного назначения методом Гретенера. — М.: НОУ ТАКИР.
68. Evaluation en Vue de la Determination de la Grandeur des Compartiments Coupe-Feu. Note Explicative de Protection Incendie. (2007). — VKF/AEAI, doc. 115—03f.
69. Kaizer, J. (1979/80). Experiences of the Gretener Method. Fire Safety Journal, 2, pp. 213—222.
70. Cluzel, D., Sarrat, P. (1979). Methode ERIC. Evaluation du Risque Incendie par le Calcul. In: Proc. CIB Symposium on Systems Approach to Fire Safety in Buildings, Vol. I, p. II/37 — II/58.
71. De Smed, E. (2008). FRAME 2008. Theoretical basis and technical reference guide. <http://www.framemethod.net>.

## Сведения об авторах

**Якуш Сергей Евгеньевич:** доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ООО «Бюро пожарных исследований», 109029, г. Москва, Сибирский проезд, д. 2, стр. 9; Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), 119526, г. Москва, пр. Вернадского, 101, корп. 1.

65 публикаций по горению, взрыву, промышленной и пожарной безопасности, математическому моделированию пожаров, взрывов, многофазных течений.

Тел.: (495) 434-95-25 (р.), (916) 590-34-17(моб.),  
E-mail: yakush@ipmnet.ru

**Эсманский Рустам Кимович:** инженер-механик, генеральный директор ООО «Бюро пожарных исследований», 109029, г. Москва, Сибирский проезд, д. 2, стр. 9.

Область интересов: пожарная безопасность, противодымная защита, вентиляционное оборудование.

8 публикаций по внутренней аэродинамике автомобилей, вентиляционному оборудованию, расчетам систем противодымной защиты и компьютерному моделированию пожаров, 50 патентов и авторских свидетельств на изобретения и полезные модели по автомобильным системам и вентиляционному оборудованию.

Тел.: (495) 679-85-00 (р.), (903) 729-83-24 (моб.),  
E-mail: novik\_n@list.ru

# Анализ пожарных рисков. Часть II: Проблемы применения

ISSN 1812-5220  
© Проблемы анализа риска, 2009

## С. Е. Якуш,

ООО «Бюро пожарных исследований»,  
Институт проблем механики  
им. А. Ю. Ишлинского  
РАН (ИПМех РАН),  
Москва

## Р. К. Эсманский,

ООО «Бюро пожарных исследований»,  
Москва

## Аннотация

Проведено сравнение существующих методов анализа пожарных рисков для зданий и сооружений. Сопоставлены сильные и слабые стороны вероятностных и эвристических методов с точки зрения наличия необходимых данных, требуемых временных, материальных и людских ресурсов, точности и востребованности получаемых результатов. Приведен пример сравнительного анализа пожарного риска вероятностным и индексным методами. Обсуждается методология применения вероятностного подхода для оценки индивидуального риска. Показано, что методика оценки риска, принятая в отечественной нормативной документации, требует приведения в соответствие с мировым уровнем. Указывается на целесообразность разработки и применения индексного метода для оценки уровня пожарной опасности.

**Ключевые слова:** анализ риска, пожарная безопасность, вероятностные методы, индексные методы.

# Fire Risk Analysis. Part II: Practical Issues

ISSN 1812-5220  
© Issues of Risk Analysis, 2009

## S. E. Yakush,

Bureau of Fire Research,  
A.Yu.Ishlinskii Institute  
for Problems in  
Mechanics, RAS,  
Moscow

## R. K. Esmanskiy,

Bureau of Fire Research,  
Moscow

## Abstract

Existing approaches to fire risk analysis for building and structures are compared. Pros and cons of the probabilistic and heuristic approaches are discussed from the viewpoint of data availability, time, material and human resources, accuracy and demand for the results obtained by each method. There are discussed some examples of comparative fire risk studies by means of probabilistic and index methods. Methodology of practical application of probabilistic approach to the individual fire risk assessment is considered. It is shown that the risk assessment method adopted in Russian codes requires revision to make it compliant to the risk assessment methodology used worldwide. The urgency for the development and implementation of national fire risk indexing method is pointed out.

**Key words:** risk analysis, fire safety, probabilistic methods, risk indexing methods.

## Содержание

1. Введение
2. Сравнение и область применения подходов к анализу риска
3. Вопросы вероятностного расчета индивидуального риска
4. Заключение
5. Литература

## 1. Введение

В первой части настоящей работы [1] на основе обзора и анализа литературы показано, что в мировой практике используется целый спектр подходов к анализу риска — от качественных до количественных. Фактически любой метод анализа риска должен дать ответы на три основных вопроса: «Что может случиться?», «Каковы могут быть последствия этого события?» и «Насколько вероятно, что такое событие произойдет?». Однако способ анализа, степень подробности и обширности требуемых данных, математический аппарат и соответственно требующиеся для проведения анализа квалификация, знания и навыки при использовании различных подходов могут отличаться кардинально, равно как и то, в какой форме будут получены ответы на каждый из трех вопросов и как их можно использовать на практике. Эти общие утверждения в полной мере относятся и к пожарным рискам как частному случаю техногенных рисков [2]. Поэтому важно иметь четкое представление о том, каковы область применения, достоинства и недостатки имеющихся подходов.

В данной статье обсуждается вопрос о том, в каких случаях наиболее целесообразным является использование вероятностного и эвристического подходов, подробно рассмотренных в [1], применительно к анализу пожарного риска для зданий и сооружений. Сравнение вероятностных и индексных методов проводится с различных точек зрения, что позволяет установить практические задачи, для выполнения которых наиболее адекватен тот или иной метод. В заключительной части работы подробно рассмотрены методологические аспекты применения вероятностного метода для оценки индивидуального пожарного риска для зданий, в том числе сопоставление отечественных методик [3] и [4] (в части оценки индивидуального пожарного риска в производственных зданиях) с принятым в мире

подходом. Это особенно важно в свете вступления в действие федерального закона [5], закрепившего необходимость проведения количественной оценки индивидуального риска и установившего его предельно допустимый уровень ( $10^{-6}$  1/год).

## 2. Сравнение и область применения подходов к анализу риска

Анализ риска практически всегда призван дать объективные данные для принятия того или иного решения (например, о признании степени пожарной безопасности объекта достаточной либо о необходимости проведения дополнительных противопожарных мероприятий, установки систем противопожарной защиты и т.п.). Поэтому уровень анализа риска (качественный, количественный), степень его подробности и конкретная методика исследования должны выбираться адекватно тому, каковы цель проведения анализа риска, имеющиеся ресурсы (включая необходимое программное обеспечение, знания, навыки и опыт людей, проводящих анализ), временные и материальные ограничения. Важно также определить, кто является потребителем полученной в результате анализа риска информации и каким образом будет осуществляться проверка достоверности сделанных в ходе анализа выводов [6].

*Качественные* методы наиболее адекватны на этапе первичного анализа пожарного риска. Уже на уровне качественного анализа зачастую возможно выделить объекты или системы, представляющие наибольшую пожарную опасность, либо события, с наибольшей вероятностью способные вызвать возникновение пожара и т.п. Важную роль при качественном анализе может играть сопоставление с имеющимися прецедентами анализа риска для аналогичных объектов. Поскольку критерии и оценки формулируются на качественном уровне (например, большая или малая вероятность, серьез-

ные или незначительные последствия), решающую роль играет имеющийся опыт проведения подобного анализа. Для уменьшения субъективизма оценок возможно применение формализованных процедур экспертных оценок (например, метода Дельфи).

*Количественные* методы, находящиеся на противоположной границе спектра имеющихся подходов к анализу риска, наоборот, призваны обеспечить высокую степень объективности и свести к минимуму субъективизм оценок. Наиболее последовательное воплощение количественные методы находят в виде анализа логических деревьев событий с использованием статистических данных и математического моделирования для оценки вероятностей ветвления и возможных последствий каждого сценария. К несомненным достоинствам такого подхода следует отнести детальный анализ всех возможных сценариев развития пожара, количественную оценку их опасности, установление взаимосвязи между различными событиями, позволяющей в явном виде оценить влияние таких факторов, как надежность отдельных технических систем, на величину риска.

Однако высокая степень детализации анализа несет в себе и основной недостаток количественных методов — их высокую трудоемкость. Разветвленность логических деревьев событий быстро возрастает с усложнением объекта анализа. Количественные методы предполагают наличие у экспертов умения проводить весьма сложный математический анализ, особенно при использовании зонных и дифференциальных моделей для расчета развития пожара, распространения дыма и оценки сопутствующих поражающих факторов. Для моделирования сценариев развития пожара требуется наличие верифицированного программного обеспечения, умения анализировать результаты расчетов с учетом особенностей моделей и заложенных в них ограничений. Существенным ограничивающим фактором для применения количественных методов может оказаться отсутствие либо недостаточное качество статистических данных, на основе которых оцениваются вероятности отдельных событий.

Для того чтобы уменьшить трудоемкость методов количественного анализа, на основе предварительного анализа все возможные сценарии развития пожара группируются в «кластеры», выбор которых

должен производиться так, чтобы число представительных сценариев было не слишком велико для анализа. При этом необходимо обеспечить, чтобы не оказались пропущенными сценарии с малой вероятностью, но катастрофическими последствиями и, с другой стороны, сценарии с относительно малыми последствиями, но большой вероятностью, поскольку вклад обеих групп сценариев в итоговый риск может оказаться значительным [7].

Важным вопросом является точность получаемой количественной оценки риска, зависящая как от наличия и качества имеющейся статистической информации (для определения вероятностей переходов между ветвями логических деревьев), так и от неточностей, вносимых математическими моделями, используемыми для расчета последствий сценариев (например, модели распространения пламени и дыма, надежности противопожарных преград, эвакуации людей и т. д.). К сожалению, из-за высокой трудоемкости метода проведение полноценного анализа чувствительности оказывается возможным лишь в простейших случаях, поскольку оно требует выполнения многочисленных расчетов при варьировании каждого определяющего параметра. Следует, однако, иметь в виду, что и требования к точности расчетов риска в области пожарной безопасности значительно отличаются от других инженерных областей (например, атомной промышленности, машиностроения) вследствие существенно больших неопределенностей данных.

С точки зрения практического применения трудно переоценить значение индексных методов анализа риска, которые, в отличие от качественных методов, дают количественную оценку уровня риска, но отличаются простотой, минимальными вычислительными требованиями и возможностью быстрой оценки уровня пожарной безопасности на основе малого числа параметров. Любой индексный метод, по сути, представляет собой простую модель сложной системы и является важным связующим звеном между теоретическими моделями этой системы и далекими от идеальных реальными условиями [8].

Индексные методы позволяют провести быстрый анализ уровня пожарной безопасности объекта, а также определить необходимость внедрения дополнительных противопожарных мероприятий.

Другим достоинством индексных методов является возможность применения методов оптимизации для определения наиболее экономически эффективного способа обеспечения заданного уровня пожарной безопасности [9]. В частности, к таким методам применимы аппарат линейного программирования.

Для успешного применения индексных методов (как, впрочем, и других методов анализа риска) необходимо четко понимать их назначение и область применимости. В частности, нельзя только на основании высокого итогового индекса пренебрегать какими-либо нормативными мероприятиями, обеспечивающими противопожарную защиту. Более того, в ряде руководств к индексным методам прямо указывается, что применять их можно только к объектам, на которых выполнены все нормативные противопожарные мероприятия [10-12]. Не являются индексные методы и инструментом проектирования инженерных систем противопожарной защиты. Так, безопасное расстояние между зданиями должно обосновываться инженерными расчетами тепловых потоков и огнестойкости, а не подбором комбинации баллов, дающих приемлемый итоговый индекс риска [11].

Главным недостатком индексных методов часто называют их эмпирический характер, отсутствие научного обоснования расчетных формул и абстрактность показателей (индексы, баллы) [13]. Однако в пользу индексных методов говорит прежде всего имеющийся опыт их практического использования в самых разнообразных областях. Кроме того, некоторые индексные методы используют элементы многокритериального анализа при выборе атрибутов пожарной безопасности и установлении весовых множителей (см. обзор в [8]) или анализ причинно-следственных связей при выборе атрибутов и функциональных зависимостей [14], что придает большую обоснованность соответствующим методам индексации пожарного риска. Другой часто упоминаемый недостаток индексного метода состоит в том, что весовые коэффициенты подбираются на основе прошлого опыта и могут не отражать текущую ситуацию, использование новых материалов и т. д. Однако этот недостаток присущ также и вероятностным методам, где используются статистические данные за длительный период времени, что

вызывает вопросы об их применимости для современных условий. Можно сказать, что поддержание методики расчета в соответствии с меняющимися условиями жизни необходимо независимо от того, какие конкретные подходы используются для расчета риска.

Для использования индексного метода эксперт, производящий оценку индивидуальных факторов, должен обладать высокой квалификацией и опытом в области пожарной безопасности. При этом, однако, от него не требуется знаний и опыта в области теории вероятности, дифференциальных уравнений, численных методов, как при использовании вероятностного подхода и моделировании развития пожара на основе зонных или полевых моделей. С этой точки зрения индексные методы представляются оптимальными с точки зрения соотношения информативности и трудозатрат для проведения анализа риска типовых зданий и сооружений, а также для целей пожарного аудита. Аппарат полного количественного анализа (вероятностные методы), требующий значительно более существенных временных, материальных и людских ресурсов, следует применять для нетиповых зданий либо при высокой концентрации пожароопасных материалов. Кроме того, индексный метод может дать обоснование необходимости проведения полного вероятностного анализа для наиболее пожароопасных ситуаций, тем самым экономя ресурсы на проведение анализа риска там, где это не требуется [9].

Поучителен пример сравнительного анализа пожарного риска на основе индексного метода FRIM и полного вероятностного подхода, приведенный в [10]. Независимые группы экспертов проанализировали обоими методами пожарный риск для людей, находящихся в четырех реальных зданиях: 1) четырехэтажном жилом здании с тремя квартирами на каждом этаже (площадью 55—70 м<sup>2</sup> при высоте потолка 2,5 м, с балконами, квартиры оборудованы спринклерами); 2) четырехэтажном здании с четырьмя квартирами (площадью 42—84 м<sup>2</sup> при высоте потолка 2,6 м, с балконами, без спринклеров); 3) четырехэтажном здании с десятью квартирами на каждом этаже (высотой 2,4 м, квартиры оборудованы спринклерами, имеется выход на внешнюю галерею); 4) трехэтажном здании с двумя квартирами на этаж (площадью 50—65 м<sup>2</sup>, высота потолка



2,5 м, без спринклеров). Конструкция всех четырех зданий имела деревянные элементы (как несущие, так и элементы фасадов).

Вероятностный анализ каждого из четырех зданий был проведен на основе построения логических деревьев событий, при этом предполагалось, что источник загорания находится на первом этаже (наиболее опасный случай). Рассматривались следующие события: режим горения (открытое пламя — 72%), сработала ли система автоматического обнаружения пожара (да — 90% для датчиков с питанием от электрической сети, 70% — для датчиков с питанием от батарей), удалось ли потушить пожар силами находящихся в здании людей (да — 19%), включилась ли спринклерная система (да — 96%), открыта или закрыта дверь (рассматриваются три случая — дверь закрыта и люди находятся в помещении, где возник пожар; дверь закрыта и люди находятся снаружи; дверь открыта и люди находятся снаружи соответствующие вероятности зависят от того, сработала ли система автоматического обнаружения пожара и снабжены ли двери доводчиками для автоматического закрывания, где находятся люди в момент возникновения пожара (например, для четырехэтажного здания рассмотрены четыре варианта: все люди находятся в своих квартирах либо люди с одного, двух или трех этажей находятся в безопасности вне здания; вероятности каждого события зависят от того, есть ли система автоматического обнаружения, и если да, то какого типа), происходит ли объемная вспышка (40% — да, если пожар не потушен) и распространение пожара на соседние помещения (да — 16%), а также находятся ли люди в состоянии сна (да — 50%).

Как видно из приведенного выше списка, при вероятностном анализе риска рассматривались весьма обширные деревья событий, поэтому был проведен предварительный качественный анализ и выделено подмножество представительных сценариев. Для каждого такого сценария рассчитывались развитие пожара (программой HAZARD I [15]) и эвакуация людей (программой SIMULEX [16]). В результате были получены профили риска  $P_{n \geq N}(N)$  (где  $P_{n \geq N}$  — вероятность поражения при пожаре  $N$  или более человек), а также средние уровни риска — математическое ожидание числа погибших при пожаре в каждом здании. Для четырех рассма-

триваемых зданий средние уровни риска оказались равными 0,11, 0,44, 0,30 и 1,14 соответственно, т. е. в порядке возрастания уровня пожарного риска здания располагаются в следующей последовательности: 1, 3, 2, 4. Отметим, что целью исследования было сравнение уровней риска в данных зданиях, поэтому определялись лишь относительные риски (т. е. вероятность возникновения пожара во всех четырех зданиях принималась одинаковой, и рассматривались условные вероятности реализации сценариев, считая, что событие возникновения пожара в здании произошло).

Параллельно с вероятностным анализом риска была проведена оценка риска на основе индексного метода FRIM версии 1.2 [10]. Оценка проводилась по семнадцати факторам, в число которых входят такие, которые не учитываются при вероятностном анализе, направленном исключительно на определение риска для находящихся в здании людей. Метод FRIM учитывает также материальный риск и риск для пожарных, осуществляющих тушение. Чтобы провести более адекватное сравнение результатов, была разработана модифицированная версия индексного метода, в которой учитывались только факторы, связанные с риском для людей (как находящихся в здании, так и пожарных). Кроме того, был создан и третий вариант метода, в котором учитывались факторы, влияющие только на эвакуацию людей. Модификации достигались перераспределением весовых коэффициентов. В результате были получены следующие индексы риска для четырех упомянутых выше зданий: исходный метод дал индексы 2,11, 2,20, 2,16 и 2,39; первый модифицированный метод дал индексы 2,73, 3,22, 3,00 и 3,62; второй модифицированный метод — 2,06, 2,22, 2,11 и 2,58. Все три модификации индексного метода дают ранжирование четырех зданий по пожарному риску в следующей последовательности: 1, 3, 2, 4; это в точности соответствует ранжированию на основе вероятностного анализа риска.

Таким образом, при несравнимо более низких затратах на основе индексного метода удалось получить тот же результат, который потребовал многочисленных вычислений и длительного анализа логических деревьев событий. Естественно, данный пример ни в коем случае не означает, что индексные методы являются заменой полноценному вероят-

ностному анализу. Он лишь подчеркивает важность и перспективность развития индексных методов как инструмента быстрого анализа пожарной безопасности, превосходно подходящего, например, для целей аудита, когда вероятностный анализ не является адекватным ни по целям, ни по трудозатратам, ни по времени выполнения.

### 3. Вопросы вероятностного расчета индивидуального риска

#### 3.1. Основные положения

Рассмотрим теперь практические аспекты использования вероятностного подхода для расчета индивидуального пожарного риска в зданиях. В самом общем виде риск какого-либо события  $R$  определяется как

$$R = P \cdot U, \quad (1)$$

где  $P$  — вероятность реализации данного события,  $U$  — ожидаемый ущерб от этого события (см. обзор в [1]). Если ущерб может возникать в результате  $N_s$  нескольких различных событий, то совокупный риск определяется суммированием по всем возможным событиям:

$$R = \sum_{i=1}^{N_s} P_i \cdot U_i. \quad (2)$$

Для индивидуального риска в качестве ущерба в определениях (1) и (2) при пожарах в зданиях рассматривается наиболее тяжелый случай — гибель людей. Как правило, принимается, что гибель человека наступает, когда в окружающей человека среде любой из нормируемых показателей (температура, концентрация токсических продуктов горения, пониженная концентрация кислорода, видимость в дыму) достигает критического значения [17]. Случаи нанесения ущерба здоровью, не приводящего к смертельному исходу (например, ожогов, отравления токсическими продуктами горения, получения травм и т. п.), обычно рассматриваются при анализе чрезвычайных ситуаций на производственных объектах, где для определения вероятности причинения того или иного ущерба широко применяется метод пробит-функций [18-24]. Заметим, что в литературе имеются и более совершенные модели воздействия пожара на людей, в которых вероятности пораже-

ния различной степени тяжести определяются в зависимости от уровня опасности (концентрации  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , других токсических газов, температуры окружающей среды) и времени воздействия [25, 26]. Такие модели могут применяться для определения числа пострадавших при пожарах в зданиях.

Поскольку индивидуальный риск определяется тем, насколько быстро люди могут эвакуироваться в условиях развивающегося пожара, первостепенное значение имеют характерные времена протекающих процессов, схематически изображенные на рис. 1.

Возникновение и развитие пожара сопровождается распространением пламени и дыма, что приводит к возникновению опасного состояния среды как в помещении, где начался пожар, так и в соседних помещениях и на путях эвакуации. Спустя определенное время после возникновения пожара показатели опасного состояния среды могут достичь критических значений, что делает дальнейшую эвакуацию людей невозможной (блокирование путей эвакуации). Соответствующий интервал времени  $t_{БЛ}$  (см. рис. 1) в зарубежной литературе (см., например, [26-28]) получил аббревиатуру ASET (*available safe egress time*, или *располагаемое* время эвакуации), в методике [3] оно называется временем блокирования путей эвакуации. Данное время зависит от геометрии помещения, характеристик очага пожара, работы противодымной вентиляции и т. п.

Другим важнейшим временем является *требуемое* время эвакуации людей  $t_э$  (в зарубежной литературе это время имеет установившуюся аббревиатуру RSET, *required safe egress time*). Данное время складывается из собственно времени движения людей (т. н. расчетное время эвакуации  $t_p$  [3]) и времени начала эвакуации  $t_{Нэ}$ , которое, в свою очередь, складывается из времени оповещения  $t_{ОП}$  и задержки начала движения  $t_3$  (*delay start time*, или *pre-movement time*). Наконец, время оповещения  $t_{ОП}$  складывается из времени обнаружения пожара  $t_{Об}$  и возможной задержки, необходимой, например, для ручной активации системы оповещения. Заметим, что в тексте Технического регламента [5], к сожалению, допущены неточности, касающиеся указанных на рис. 1 времен. Во-первых, нарушается условие сопоставимости времен  $t_э$  и  $t_{БЛ}$  поскольку в п. 3 статьи 53 отсчет времени эвакуации указан

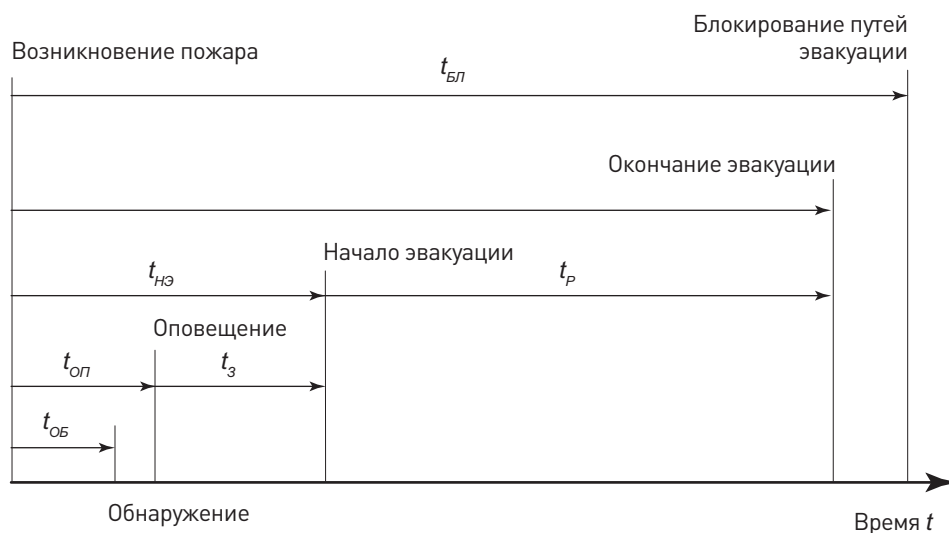


Рис. 1. Характерные времена процессов развития пожара и эвакуации

от момента обнаружения, а не от момента возникновения пожара. Во-вторых, время  $t_{бл}$  в [5] называется «необходимым временем эвакуации», тогда как на самом деле это *располагаемое* время эвакуации (ASET).

Перечисленные выше составляющие времени эвакуации (за исключением  $t_{об}$  для системы автоматического обнаружения пожара и, возможно,  $t_{оп}$ , если оповещение также осуществляется автоматически) существенным образом зависят от поведенческих особенностей, психофизиологического состояния людей и т. п., поэтому их моделирование сопряжено со значительными неопределенностями. Например, для времени задержки начала движения  $t_3$  в литературе рассматриваются три составляющие процесса (осознание, интерпретация и действие) [26]. В работе [3] время начала эвакуации  $t_{нэ}$  устанавливается в зависимости от функционального назначения помещений, косвенно характеризующего состояние находящихся в них людей, наличия и типа систем оповещения и управления эвакуацией, но не учитывается, что время обнаружения  $t_{об}$  зависит от других характеристик: параметров очага пожара и геометрии помещения.

Для каждого  $i$ -го сценария развития пожара условие безопасной эвакуации людей состоит в том, что требуемое время эвакуации людей  $t_{э,i}$  должно быть меньше времени блокирования путей эвакуа-

ции  $t_{бл,i}$  (возможно, с некоторым коэффициентом запаса). В противном случае часть эвакуируемых может подвергнуться воздействию поражающих факторов. Число пострадавших для  $i$ -го сценария (то есть для фиксированной планировки здания, количества и расположения эвакуационных выходов, характеристик пожара, действия систем противопожарной защиты и т. д.) есть функция времен  $t_{бл,i}$  и  $t_{э,i}$ , а также общего количества людей, находившихся в здании в момент начала пожара.

Поскольку гибель людей может явиться результатом различных сценариев развития пожара, при вероятностном анализе риска необходимо рассмотреть совокупность всех возможных сценариев  $S_i$  ( $i = 1, \dots, N_s$ ), для каждого из них определить вероятность реализации  $P(S_i)$  и последствия  $U(S_i)$ , а затем вычислить суммарный риск (см. формулу (2)). При этом удобно выделить частоту возникновения пожаров  $Q_{п}$  отдельным множителем, а в качестве  $P(S_i)$  рассматривать *условные* вероятности сценариев при возникновении инициирующего события — пожара. Тогда общая формула (2) примет вид

$$R = Q_{п} \sum_{i=1}^{N_s} P(S_i) \cdot U(S_i). \quad (3)$$

Величина  $R$  в (3) представляет собой *абсолютный* риск, он характеризует ожидаемый ущерб от пожара в единицу времени (за год). Наряду с этим показа-

телем представляет интерес рассматривать *относительный* риск для людей при условии, что в данном здании возник пожар:

$$R_{\Pi} = \sum_{i=1}^{N_s} P(S_i) \cdot U(S_i). \quad (4)$$

Данный показатель не зависит от частоты иницирующего события, а характеризует число пострадавших в расчете на один пожар, возникший в присутствии людей. Он может быть удобен, например, для сравнения эффективности различных проектных решений систем противопожарной защиты, путей эвакуации и т. д.

Конкретизируем теперь каждую из указанных составляющих метода оценки риска, предварительно сделав следующее важное замечание. В настоящей работе намеренно не рассматриваются методики расчета представленных на рис. 1 характерных времен, в том числе не затрагиваются такие вопросы, как выбор адекватного метода расчета пожара (интегральный, зонный, дифференциальный) или модели эвакуации. Данным вопросам посвящена обширная специализированная литература (см., например, [3, 29, 30]), здесь же предполагается, что для каждого сценария пожара возможно тем или иным образом определить представленные на рис. 1 характерные времена  $t_{Э,i}$  и  $t_{БЛ,i}$ , равно как и число людей  $n_p$ , подвергнувшихся воздействию поражающих факторов при данной сценарии развития пожара.

### 3.2. Логическое дерево событий для оценки индивидуального пожарного риска

Первый вопрос, который необходимо решить при проведении вероятностного анализа риска, — выбор представительных сценариев и построение соответствующего логического дерева событий. Количество «ветвлений» дерева событий, с одной стороны, должно отражать наиболее существенные ситуации, которые могут возникнуть при пожаре. При этом должны учитываться положение источника загорания, пути распространения пожара и дыма, возможность возникновения критических уровней поражающих факторов на путях эвакуации, влияние систем противопожарной защиты с учетом возможных отказов, эвакуация людей и возможность блокирования эвакуационных путей и т. д. С другой стороны,

число сценариев не должно быть слишком велико, чтобы не приводить к чрезмерным временным и материальным затратам на проведение вероятностного анализа. Вид получаемого дерева событий в сильной степени зависит от особенностей рассматриваемого объекта, а процедура выделения «кластеров» сценариев трудно поддается формализации, хотя общие ее принципы сформулированы в [7].

В качестве демонстрационного примера рассмотрим здание, в котором установлены системы противопожарной защиты, упоминаемые в методике [3]: 1) система обнаружения пожара (пожарной сигнализации) (ОБН) с вероятностью эффективного срабатывания  $R_{ОБН}$ ; 2) система оповещения людей о пожаре и управления эвакуацией (СОУЭ) с вероятностью эффективного срабатывания в случае срабатывания системы пожарной сигнализации  $R_{СОУЭ}$ ; 3) система противодымной защиты (ПДЗ) с вероятностью эффективного срабатывания в случае срабатывания системы пожарной сигнализации  $R_{ПДЗ}$ . Автоматические установки пожаротушения (АУПТ) в данном примере не рассматриваются, особенности их учета обсуждаются ниже.

На рис. 2 приведено соответствующее логическое дерево событий, где через  $R_i$  обозначены условные вероятности эффективного срабатывания  $i$ -й системы противопожарной защиты, а через  $\bar{R}_i = 1 - R_i$  — соответствующие вероятности отказа (индекс  $i$  означает систему — см. выше). Условная вероятность иницирующего события (соответствующего корню логического дерева) принята равной единице, так что фактически рассматривается относительный риск  $R_{\Pi}$  — см. (4), абсолютный риск может быть получен умножением относительного риска на величину  $Q_{\Pi}$  — см. (3). Отметим также, что системы СОУЭ и ПДЗ считаются независимыми, поэтому вероятности срабатывания или отказа системы ПДЗ приняты одинаковыми как при срабатывании, так и при отказе системы СОУЭ. Кроме того, считается, что если не срабатывает система обнаружения, то обе системы СОУЭ и ПДЗ не включаются. Видно, что в целом возможна реализация пяти сценариев развития пожара  $S_1$ - $S_5$ , характеристики которых приведены в таблице 1, где также указаны вероятности реализации каждого сценария, полученные перемножением условных вероятностей вдоль соответствующей ветви логического дерева.

Чтобы придать построенному логическому дереву более конкретный вид, на рис. 2 для каждого «ветвления» в скобках приведены условные вероятности, основанные на рекомендациях методики [3] ( $R_{\text{ОБН}} = R_{\text{СОУЭ}} = R_{\text{ПДЗ}} = 0,8$ ). Кроме того, для каждого из пяти сценариев на рис. 2 представлены итоговые вероятности их реализации, вычисленные по формулам из правого столбца таблицы 1. Видно, что наиболее вероятным является сценарий  $S_1$ , когда все три системы (ОБН, СОУЭ и ПДЗ) срабатывают (наиболее благоприятные условия для эвакуации),

но следующим в порядке убывания вероятности идет наиболее тяжелый случай (сценарий  $S_5$ ), когда не срабатывает ни одна из систем. Далее следуют два сценария, когда не срабатывает лишь одна из систем СОУЭ и ПДЗ ( $S_2$  и  $S_3$ ), и, наконец, наименее вероятным является одновременный отказ обеих систем СОУЭ и ПДЗ при срабатывании системы обнаружения ( $S_4$ ).

Приведенный на рис. 2 пример не включает автоматические установки пожаротушения (АУПТ). При их наличии соответствующие изменения

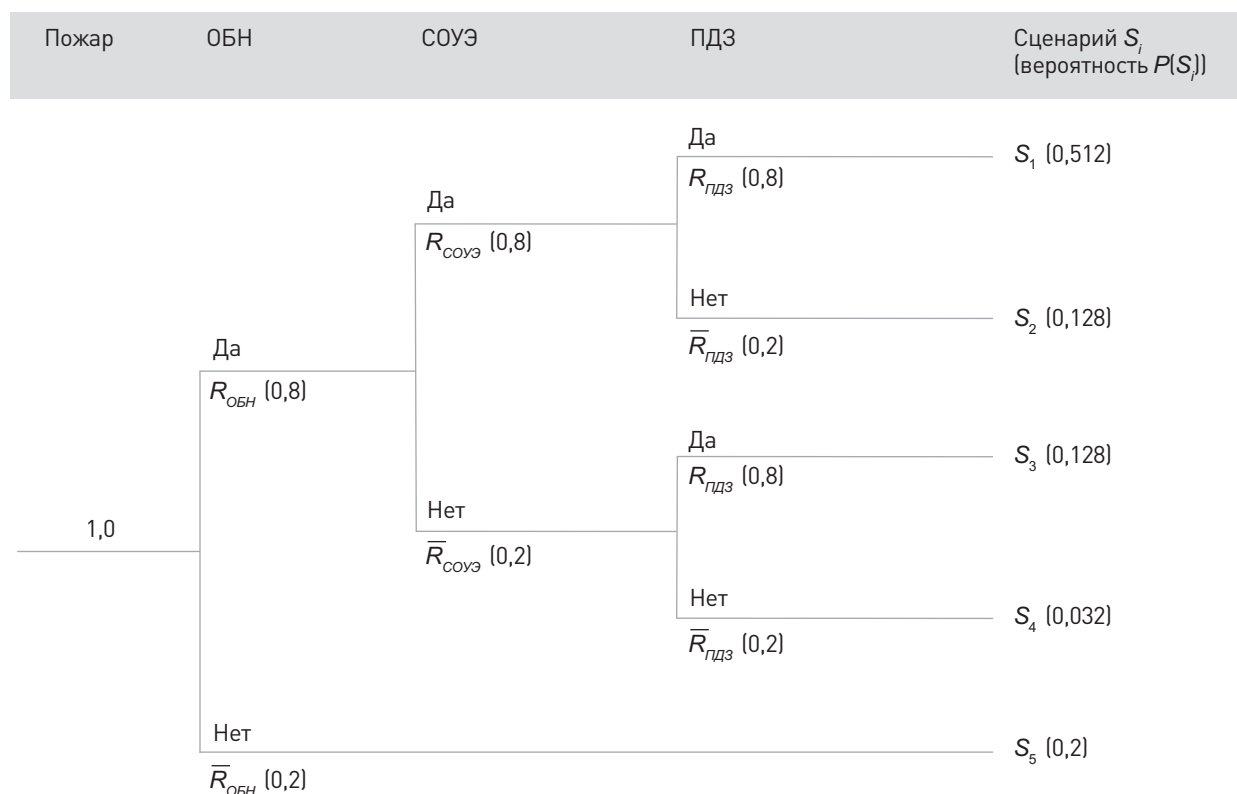


Рис. 2. Логическое дерево событий при пожаре в здании, оборудованном системами обнаружения пожара (ОБН), оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) и противодымной защиты (ПДЗ)

Сценарии развития пожара и их условные вероятности

Таблица 1

Сценарий	ОБН	СОУЭ	ПДЗ	Вероятность $P(S_i)$
$S_1$	Да	Да	Да	$R_{\text{ОБН}} \cdot R_{\text{СОУЭ}} \cdot R_{\text{ПДЗ}}$
$S_2$	Да	Да	Нет	$R_{\text{ОБН}} \cdot R_{\text{СОУЭ}} \cdot \bar{R}_{\text{ПДЗ}}$
$S_3$	Да	Нет	Да	$R_{\text{ОБН}} \cdot \bar{R}_{\text{СОУЭ}} \cdot R_{\text{ПДЗ}}$
$S_4$	Да	Нет	Нет	$R_{\text{ОБН}} \cdot \bar{R}_{\text{СОУЭ}} \cdot \bar{R}_{\text{ПДЗ}}$
$S_5$	Нет	—	—	$\bar{R}_{\text{ОБН}}$

должны быть внесены в дерево событий, причем характер изменений определяется типом применяемых АУПТ, их возможным воздействием на пожар и т. д. В логическом дереве также должны быть учтены причинно-следственные связи, связанные с активацией АУПТ, — например, приводятся ли они в действие рассмотренной выше системой обнаружения пожара (ОБН) или активируются независимо. Примером независимой активации может служить спринклерная установка пожаротушения, термочувствительный элемент оросителей которой реагирует на температуру окружающей среды, т. е. является достаточно инерционным по сравнению с дымовыми извещателями, используемыми в системе пожарной сигнализации. Временные задержки при активации АУПТ могут быть незначительными по сравнению с общей продолжительностью пожара, но играть существенную роль с точки зрения обеспечения эвакуации людей.

Временной фактор следует учитывать и при оценке эффективности работы АУПТ с точки зрения обеспечения безопасности людей. Технический регламент [5] определяет задачей АУПТ ликвидацию пожара (статья 61). Однако тушение пожара происходит не мгновенно, а может продолжаться в течение времени, достаточно длительного по сравнению со временем эвакуации людей. Кроме того, срабатывание спринклерной или дренчерной системы может лишь сдерживать пожар, уменьшать интенсивность горения и препятствовать распространению пожара, не вызывая, однако, его полного тушения [31]. В этом случае в логическом дереве событий необходимо предусмотреть ветвь, на которой характеристики пожара (площадь, периметр очага, скорость выгорания) изменяются соответствующим образом при успешной активации спринклеров. Примером может служить британский стандарт [32], где приведены характеристики расчетного пожара для определения параметров систем противодымной защиты в различных зданиях при наличии или отсутствии спринклерных установок. Так, для стационарного пожара в торговых предприятиях при отсутствии спринклерных установок в качестве площади пожара рекомендуется брать площадь всего помещения (т. е. предполагается объемная вспышка), удельная мощность тепловыделения

при этом составляет  $1200 \text{ кВт/м}^2$ . При наличии спринклерных установок удельная мощность тепловыделения снижается до  $625 \text{ кВт/м}^2$ , причем для оросителей с обычной температурой срабатывания площадь расчетного пожара уменьшается до  $10 \text{ м}^2$ , а для спринклеров с пониженной температурой срабатывания — до  $5 \text{ м}^2$ . Для нестационарных расчетных пожаров наличие спринклерных установок также учитывается посредством уменьшения скорости нарастания мощности тепловыделения в квадратичном законе.

В силу указанных причин влияние АУПТ на индивидуальный риск должно оцениваться путем расчета динамики развития пожара на основе адекватной модели с учетом задержки срабатывания (которая зависит как от инерционности датчиков, так и от характеристик пожара на начальной стадии) и последующего влияния АУПТ на очаг пожара и распространение дыма.

### 3.3. Определение последствий пожара

В соответствии с формулами (3) и (4) после построения логического дерева событий (рис. 2) и определения вероятностей сценариев  $P(S_i)$  (таблица 1) необходимо определить количественную меру последствий каждого сценария  $U(S_i)$ . При расчете индивидуального пожарного риска, как уже отмечалось, в качестве ущерба рассматривают гибель людей, поэтому естественной мерой ущерба для  $i$ -го сценария пожара является число погибших  $n_i$ , то есть количество людей, не успевших эвакуироваться к моменту блокирования путей эвакуации [26, 28, 33]. Если эвакуация людей происходит равномерно (с постоянной скоростью), то  $n_i = N \cdot (t_{Э,i} - t_{БЛ,i}) / t_{Э,i}$ , где  $N$  — общее число людей в здании в момент возникновения пожара. При возникновении заторов или при наличии различных категорий эвакуирующихся зависимость  $n_i$  от  $N$ ,  $t_{Э,i}$  и  $t_{БЛ,i}$  является более сложной и должна определяться из соответствующей модели эвакуации.

Особо отметим, что времена,  $t_{Э,i}$  и  $t_{БЛ,i}$ , определяющие число погибших для  $i$ -го сценария пожара, могут существенно отличаться для различных сценариев в зависимости от срабатывания или отказа технических средств противопожарной защиты. Так, в рассматриваемом примере (см. рис. 2

и таблицу 1) срабатывание или отказ системы СОУЭ прямо влияет на время начала эвакуации  $t_{НЭ}$ , тогда как срабатывание или отказ системы ПДЗ меняет время  $t_{БЛ}$ . Обе эти системы зависимы от системы пожарной сигнализации, несрабатывание которой эквивалентно одновременному отказу систем СОУЭ и ПДЗ. С точки зрения эвакуации людей и блокирования путей эвакуации сценарии  $S_4$  и  $S_5$  эквивалентны, поэтому для них расчет последствий может проводиться один раз (в дальнейшем будем обозначать этот сценарий как  $S_{4-5}$ , его вероятность равна  $P(S_4)+P(S_5)$ ). На наш взгляд, сценарий  $S_1$ , при котором все системы противопожарной защиты срабатывают, обязательно следует включать в рассмотрение. В этом случае правильно спроектированные системы защиты должны обеспечивать безопасную эвакуацию всех находящихся в здании людей. Поэтому если расчеты дадут обратный результат, это будет свидетельствовать либо об ошибке в проекте, либо об ошибке в используемых моделях.

Таким образом, в рассматриваемом примере число погибших при пожаре необходимо рассчитывать для четырех сценариев:  $S_1$  (сработали системы СОУЭ и ПДЗ),  $S_2$  (сработала только СОУЭ),  $S_3$  (сработала только система ПДЗ),  $S_{4-5}$  (одновременный отказ систем СОУЭ и ПДЗ). В первом приближении расчет пожара и оценку времени блокирования путей эвакуации  $t_{БЛ}$  достаточно провести два раза (с включенной и выключенной системой ПДЗ), а расчетное время эвакуации  $t_p$  достаточно определить один раз: во всех моделях эвакуации, рекомендованных в методике [3], движение людей рассчитывается независимо от развития пожара, а время начала эвакуации  $t_{НЭ}$ , зависящее от срабатывания системы СОУЭ, определяется по таблицам [3] и арифметически добавляется к расчетному времени эвакуации  $t_p$ .

Каждая комбинация срабатываний и отказов систем дает уникальное сочетание характерных времен, которое в общем случае не может быть предсказано заранее, без проведения расчетов (например, заранее не ясно, что является более опасным с точки зрения эвакуации людей — отказ системы оповещения и задержка начала эвакуации или отказ системы ПДЗ и более быстрое блокирование эвакуационных путей). Следует

также иметь в виду, что для сложных объектов, где возможно блокирование части эвакуационных путей и динамическое перенаправление людских потоков к свободным выходам, каждый сценарий может потребовать полного расчета движения людей на основе более совершенных моделей, учитывающих влияние пожара на процесс эвакуации (т. е. для рассматриваемого примера может потребоваться два расчета развития пожара и четыре расчета эвакуации людей). Это же справедливо и в тех случаях, когда при эвакуации возникают заторы и число людей, подвергающихся воздействию поражающих факторов, не является простой функцией времен эвакуации и блокирования, а должно определяться непосредственно из модели эвакуации.

При расчете числа погибших при пожаре в ряде случаев необходимо учитывать, что в зависимости от времени возникновения пожара в здании может находиться разное число людей  $N$  (этот параметр используется в модели эвакуации для определения числа погибших — см. выше). Если люди могут присутствовать на объекте лишь часть времени (торговые центры, офисы, поликлиники, и т. п.), для каждого сценария развития пожара, определенного на основе дерева событий, достаточно провести один расчет эвакуации, а вероятность сценария умножить на вероятность присутствия людей  $P_{ПР}$  (определенную как долю времени суток, в течение которой присутствуют люди, см. [3]). Если же люди присутствуют круглосуточно (например, жилые дома), то можно либо консервативно принять  $P_{ПР} = 1$  и проводить также один расчет эвакуации с максимальным числом присутствующих людей  $N$ , либо, если имеются достаточные данные, определить доли времени  $P_{ПР,j}$  в течение которых в здании находится определенное число людей  $N_j$  (например, в дневное и ночное время), провести расчеты числа погибших  $n_{i,j}$  для  $i$ -го сценария пожара в  $j$ -й период времени, после чего определить ожидаемое число погибших для  $i$ -го сценария как  $n_i = \sum P_{ПР,j} \cdot n_{i,j}$ . Заметим, что вследствие возможной нелинейной зависимости числа погибших от числа находящихся в здании нельзя заменять несколько расчетов эвакуации для разных периодов времени одним для «среднего» числа находящихся в здании людей  $\sum P_{ПР,j} \cdot N_j$ .

### 3.4. Нахождение коллективного и индивидуального пожарного риска

Подставляя в формулу (4) в качестве меры ущерба число погибших при данном сценарии пожара, получим

$$R_{\Pi} = \sum_{i=1}^{N_s} P_i \cdot n_i \quad (5)$$

(для краткости здесь и далее для условных вероятностей сценариев используется обозначение  $P_i = P(S_i)$ ). Фактически формула (5) дает математическое ожидание числа погибших на один пожар для данного объекта, поэтому величина  $R_{\Pi}$  имеет размерность [чел./пож.]. Поскольку в (5) не входит вероятность возникновения пожара,  $R_{\Pi}$  в первую очередь характеризует эффективность применяемых на объекте противопожарных мероприятий.

Умножение формулы (5) на вероятность возникновения пожара на объектах данного функционального назначения  $Q_{\Pi}$  [пож./год] дает

$$R_K = Q_{\Pi} \sum_{i=1}^{N_s} P_i \cdot n_i, \quad (6)$$

математическое ожидание числа погибших на рассматриваемом объекте в единицу времени (за год):  $R_K$  имеет размерность [чел./год]. Данный показатель носит название коллективного риска [23].

Наконец, поделив (6) на номинальное число присутствующих на объекте людей  $N$ , получим величину индивидуального пожарного риска в расчете на одного человека в единицу времени (см. также [34]):

$$R_{II} = Q_{\Pi} \sum_{i=1}^{N_s} P_i \cdot \frac{n_i}{N} = Q_{\Pi} \sum_{i=1}^{N_s} P_i \cdot \bar{P}_{\Delta,i}, \quad (7)$$

где  $\bar{P}_{\Delta,i} = 1 - P_{\Delta,i}$ , а  $P_{\Delta,i} = (N - n_i)/N$  — вероятность эвакуации людей для  $i$ -го сценария, равная доле успешно эвакуировавшихся людей от общего числа присутствующих (размерность  $R_{II}$  — [1/год]). В зарубежной литературе эквивалентный  $R_{II}$  показатель индивидуального риска получил аббревиатуру *ERL* (*expected risk to life*) [26, 28]:

$$ERL = \frac{N_{tot}}{N \cdot t_D}, \quad (8)$$

где:  $N_{tot}$  — общее ожидаемое число погибших за расчетный срок эксплуатации объекта  $t_D$ ,  $N$  — число людей, номинально присутствующих на объекте. Эквивалентность (7) и (8) легко показать, если учесть, что отношение  $N_{tot}/t_D$  есть среднее число погибших в единицу времени, т.е. величина  $R_K$  (см. (6)).

Возвращаясь к демонстрационному примеру (см. рис. 2 и таблицу 1), приведем окончательные выражения для разных видов пожарного риска, конкретизирующие формулы (5)-(7):

$$R_{\Pi} = R_{OБН} \cdot R_{COУЭ} \cdot R_{ПДЗ} \cdot n_1 + R_{OБН} \cdot R_{COУЭ} \cdot \bar{R}_{ПДЗ} \cdot n_2 + R_{OБН} \cdot \bar{R}_{COУЭ} \cdot R_{ПДЗ} \cdot n_3 + (R_{OБН} \cdot \bar{R}_{COУЭ} \cdot \bar{R}_{ПДЗ} + \bar{R}_{OБН}) \cdot n_{4-5}, \quad (9)$$

$$R_K = Q_{\Pi} P_{\Pi} R_{\Pi}, \quad R_{II} = R_K / N. \quad (10)$$

Соотношения (9), (10) являются результатом анализа логического дерева событий (рис. 2) и отражают основные этапы вероятностного анализа риска [2, 23, 26, 33, 35]: 1) рассмотрение всех возможных сценариев (с выделением нескольких наиболее представительных); 2) вычисление вероятности и последствий каждого сценария; 3) окончательное определение риска суммированием вкладов всех сценариев.

Показатели индивидуального и коллективного риска (5)–(7), имеют ясный смысл — математическое ожидание числа погибших при пожарах, отнесенное на один пожар, на единицу времени и на одного человека. Их легко интерпретировать, в частности, сравнивать со статистическими данными, — например, с общим уровнем пожарного риска в виде количества погибших на пожарах в стране на миллион населения или числом погибших на один пожар в зданиях данного функционального назначения.

Чтобы проиллюстрировать процедуру вычисления риска, дополним рассмотренный выше демонстрационный пример количественными данными по эвакуации для различных сценариев пожара. Предположим, что на момент начала пожара в здании находится  $N=100$  человек, при срабатывании обеих систем противопожарной защиты (сценарий  $S_1$  в таблице 1) все люди успевают безопасно эвакуироваться ( $n_1 = 0$ ), при отказе системы СОУЭ



и срабатывании системы ПДЗ число погибших прием равным  $n_2 = 2$ , при срабатывании СОУЭ и отказе ПДЗ —  $n_3 = 4$ , при одновременном отказе обеих систем —  $n_{4-5} = 6$  (еще раз подчеркнем, что эти данные условные, для реальных объектов число погибших определяется расчетом на основе соответствующих моделей развития пожара и эвакуации людей). Вероятность возникновения пожара прием равной  $Q_{II} = 2 \cdot 10^{-2}$  1/год (предприятие торговли [3]), вероятность присутствия людей  $P_{II} = 0,5$ .

Представляет интерес сравнить значения риска при различных надежности срабатывания каждой из двух систем противопожарной защиты ( $R_{СОУЭ}$  и  $R_{ПДЗ}$ ). Для рассматриваемого демонстрационного примера вероятностям срабатывания систем противопожарной защиты  $P_{СОУЭ}$  и  $P_{ПДЗ}$  задавались четыре значения (0,2, 0,5, 0,8 и 0,95), что в сумме дает 16 различных комбинаций, каждая из которых определяет вероятности отдельных сценариев, перечисленных в таблице 1. Кроме того, во всех случаях вероятность обнаружения пожара считалась постоянной  $R_{ОБН} = 0,8$ . При низкой надежности обеих систем (вероятности срабатывания  $R_{СОУЭ} = 0,2$ ,  $R_{ПДЗ} = 0,2$ ) вероятности сценариев  $S_1 - S_{4-5}$  составляют 0,032, 0,128, 0,128, 0,712. При высокой надежности одной из систем ( $R_{СОУЭ} = 0,2$ ,  $R_{ПДЗ} = 0,95$ ) вероятности

тех же сценариев равны 0,152, 0,008, 0,608, 0,232. Наконец, при высокой надежности обеих систем ( $R_{СОУЭ} = 0,95$ ,  $R_{ПДЗ} = 0,95$ ) имеем вероятности сценариев 0,722, 0,038, 0,038, 0,202 соответственно. Видно, что в зависимости от надежности систем противопожарной защиты наиболее вероятными могут быть разные сценарии, при этом вероятность сценария с одновременным отказом  $S_{4-5}$  ограничена снизу значением 0,2, определяемым надежностью системы обнаружения.

Для каждой комбинации ( $R_{СОУЭ}$ ,  $R_{ПДЗ}$ ) по формулам (9), (10) вычислялось значение индивидуального риска  $R_{II}$ . Результаты расчетов представлены на рис. 3а в виде двумерной столбчатой гистограммы, где надежности систем  $R_{СОУЭ}$  и  $R_{ПДЗ}$  отложены по горизонтальным осям, а индивидуальный риск — по вертикальной. Видно, что за счет повышения надежности обеих систем от 0,2 до 0,95 можно добиться снижения индивидуального риска с  $5,04 \cdot 10^{-4}$  до  $1,44 \cdot 10^{-4}$  1/год (т. е. практически до уровня, определяемого надежностью системы обнаружения пожара). Обращает на себя внимание несимметричность графика по отношению к изменению надежностей систем СОУЭ и ПДЗ, отражающая разное влияние этих систем на вероятность успешной эвакуации и соответственно число погибших.

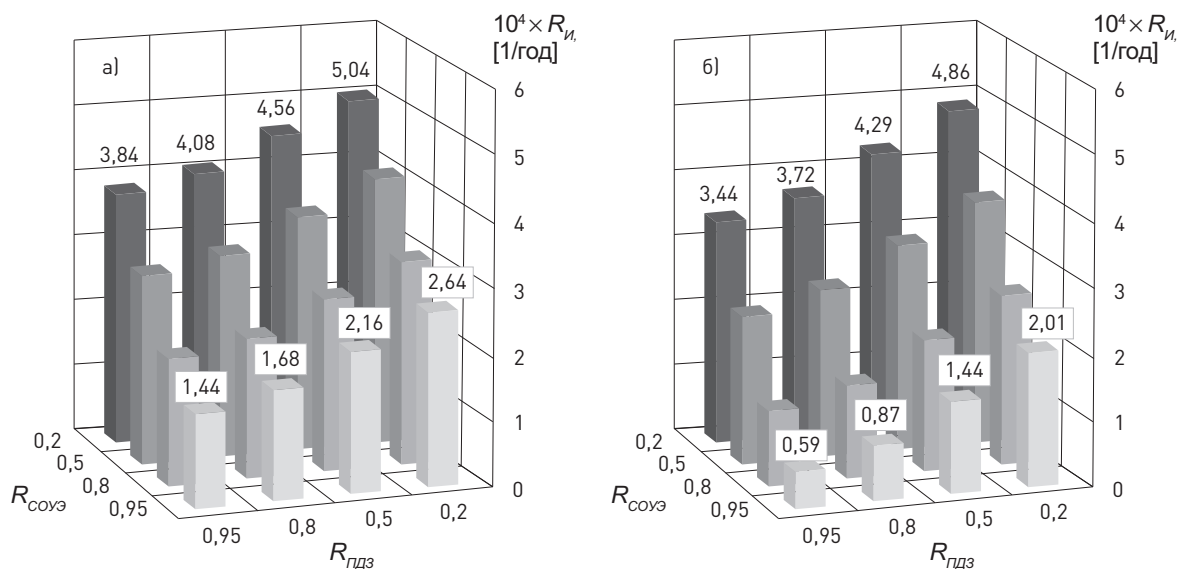


Рис. 3. Индивидуальный риск  $R_{II}$ , рассчитанный на основе логического дерева событий при различных надежность систем противопожарной защиты: а)  $R_{ОБН} = 0,8$ ; б)  $R_{ОБН} = 0,95$

На рис. 3б представлены аналогичные результаты, полученные при повышении надежности системы обнаружения пожара до  $R_{ОБН} = 0,95$ . Сравнение уровней риска на рис. 3а и б наглядно показывает, что при низких надежность систем СОУЭ и ПДЗ повышение надежности системы обнаружения пожара практически не меняет величину риска. При высоких же надежность систем СОУЭ и ПДЗ система обнаружения становится определяющей, и за счет повышения ее надежности с 0,8 до 0,95 возможно почти трехкратное снижение риска (с  $1,44 \cdot 10^{-4}$  до  $5,9 \cdot 10^{-5}$ ). Конечно, данный вывод сделан для заданных выше параметров эвакуации, для реальных объектов ситуация может быть количественно иной. Однако основной качественный вывод останется неизменным: при оценке риска важен как адекватный анализ сценариев пожара, так и учет срабатывания или отказа каждой системы противопожарной защиты.

### 3.5. Сравнение с отечественными методиками оценки риска

В связи с тем, что при отклонении от требований нормативных документов по пожарной безопасности или отсутствию таких требований Технический регламент [5] требует проведения расчета пожарного риска, необходимо проанализировать и сравнить с мировой практикой подходы и расчетные формулы, имеющиеся в отечественной нормативной документации и методической литературе.

Отечественный опыт нормирования пожарных рисков исчисляется с 1976 г., когда в рамках ГОСТа 12.1.004-76 «Пожарная безопасность. Общие требования» было введено нормирование «вероятности воздействия опасных факторов пожара на человека» (см. [22]). Статья 79 Технического регламента [5] устанавливает, что «Индивидуальный пожарный риск в зданиях, сооружениях и строениях не должен превышать значение одной миллионной в год при размещении отдельного человека в наиболее удаленной от выхода из здания, сооружения и строения точке». Таким образом, критерием успешной или безуспешной эвакуации является гибель *хотя бы одного* человека, т. е. фактически нормируемой величиной является риск возникновения пожара с гибелью людей. При этом вопрос о том, какое количество людей погибнет в случае,

если эвакуация не была успешной, не рассматривается, в отличие от принятого в других странах подхода (см. раздел 3.4), где индивидуальный риск определяется через вероятное число погибших при пожаре. Поэтому сопоставление нормативного уровня индивидуального риска ( $10^{-6}$  1/год) [5] с данными по гибели населения на пожарах требует достаточно сложного анализа с привлечением статистических методов [36].

Рассмотрим теперь имеющиеся в отечественной документации методики оценки пожарного риска в зданиях. Согласно Приложению 2 ГОСТа 12.1.004-91 [17] (а также Приложению Ш к ГОСТу Р 12.3.047-98 [20] для производственных зданий) индивидуальный пожарный риск  $Q_B$  предписывается вычислять как

$$Q_B = Q_{II} P_{ПР} (1 - P_{ПЗ}) (1 - P_Э), \quad (11)$$

где:  $Q_{II}$  — частота возникновения пожара в здании в течение года;  $P_{ПР}$  — вероятность присутствия людей (в [17]  $P_{ПР} = 1$ );  $P_Э$  — вероятность эвакуации людей;  $P_{ПЗ}$  — вероятность эффективной работы технических решений противопожарной защиты

$$P_{ПЗ} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i). \quad (12)$$

Здесь  $R_i$  — вероятность эффективного срабатывания  $i$ -го технического решения,  $i=1, \dots, n$ .

В методике оценки риска [3], выпущенной во исполнение Технического регламента [5], для индивидуального пожарного риска приведена формула

$$Q_B = Q_{II} (1 - R_{АИГ}) P_{ПР} (1 - P_{ПЗ}) (1 - P_Э). \quad (13)$$

По существу (13) является модификацией формулы (11), в которой из общей вероятности эффективной работы технических решений противопожарной защиты (12) выделен отдельный множитель, содержащий вероятность эффективного срабатывания установок автоматического пожаротушения  $R_{АИГ}$ . Кроме того, вероятность эффективной работы остальных технических решений противопожарной защиты (СОУЭ, ПДЗ) учитывается не в виде (12), а по формуле

$$P_{ПЗ} = 1 - (1 - R_{ОБН} R_{СОУЭ}) \cdot (1 - R_{ОБН} R_{ПДЗ}). \quad (14)$$

Вероятность успешной эвакуации, входящая в (13), определяется по формуле [3]:

$$P_{\text{Э}} = \begin{cases} \frac{0,8t_{\text{БЛ}} - t_p}{t_{\text{НЭ}}} & \text{при } t_p < 0,8t_{\text{БЛ}} < t_p + t_{\text{НЭ}} \text{ и } t_{\text{СК}} \leq 6 \text{ мин.} \\ 0,999 & \text{при } t_p + t_{\text{НЭ}} \leq 0,8t_{\text{БЛ}} \text{ и } t_{\text{СК}} \leq 6 \text{ мин.} \\ 0 & \text{при } t_p \geq 0,8t_{\text{БЛ}} \text{ или } t_{\text{СК}} > 6 \text{ мин.} \end{cases} \quad (15)$$

По сравнению с более ранними версиями [17, 20] формула (15) содержит коэффициент безопасности 0,8 при времени блокирования  $t_{\text{БЛ}}$  кроме того, вводятся ограничения на время существования скопления людей на путях эвакуации  $t_{\text{СК}}$ . Эвакуация считается успешной (с вероятностью 0,999), если время эвакуации  $t_{\text{Э}} = t_{\text{НЭ}} + t_p$  (в (15) — с коэффициентом запаса 0,8) не превышает времени блокирования путей эвакуации. В противном случае (если хотя бы один человек обязательно подвергнется воздействию опасных условий окружающей среды с летальным исходом) эвакуация считается безуспешной ( $P_{\text{Э}}=0$ ). В промежутке между этими предельными случаями используется линейная интерполяция.

С точки зрения общепринятого вероятностного подхода к анализу риска, рассмотренного выше, формулы (13)—(15) [3] вызывают серьезные возражения. Для удобства рассмотрения их сути подставим соотношение (14) в формулу (13) и приведем ее к виду:

$$Q_{\text{В}} = Q_{\text{П}} P_{\text{ПП}} \bar{R}_{\text{АП}} \bar{P}_{\text{ПЗ}} \bar{P}_{\text{Э}} \quad (16)$$

(для риска, определенного по методике [3], сохраним принятое в ней обозначение  $Q_{\text{В}}$ , кроме того,  $\bar{R}_{\text{АП}} = 1 - R_{\text{АП}}$ ,  $\bar{R}_{\text{ПЗ}} = 1 - R_{\text{ПЗ}}$  и  $\bar{P}_{\text{Э}} = 1 - P_{\text{Э}}$ ).

Основным методологическим отличием формулы (16) от общей формулы для риска (4) и ее конкретного воплощения (9), (10) является *отсутствие суммирования* по сценариям развития пожара. Фактически индивидуальный риск  $Q_{\text{В}}$  предлагается определять из условия невозможности эвакуации людей для единственного сценария пожара. Согласно логике формулы (16) таковым сценарием считается *одновременное несрабатывание* системы АП и остальных систем противопожарной защиты (поскольку в (16) входит произведение соответствующих

вероятностей отказов). Аналогичный вид имеет и более ранняя формула (11): с учетом (12) имеем  $Q_{\text{В}} = Q_{\text{П}} P_{\text{ПП}} \bar{R}_1 \bar{R}_2 \dots \bar{R}_n \bar{P}_{\text{Э}}$  (где  $\bar{R}_i = 1 - R_i$  — вероятности отказа технических решений противопожарной защиты). Включение в формулу для риска (16) только произведения вероятностей отказов сразу всех технических решений и игнорирование остальных комбинаций вероятностей (см. рис. 2 и таблицу 1) указывает на то, что технические решения противопожарной защиты предполагаются независимыми и взаимно дублирующими друг друга, так что срабатывание хотя бы одного из них гарантирует безопасную эвакуацию (в теории надежности формулы вида (16) описывают системы с параллельным соединением резервирующих элементов [37]). Однако системы СОУЭ и ПДЗ не являются взаимно дублирующими, поскольку, как обсуждалось выше, влияют на разные показатели — время эвакуации и время блокирования, а следовательно, возможность безопасной эвакуации при срабатывании лишь одной из систем требует подтверждения расчетами. Наличие АУПТ даже в случае эффективного срабатывания не гарантирует само по себе безопасной эвакуации вследствие рассмотренной выше инерционности активации, длительности процесса тушения и возможности продолжения горения, если пожар удастся не ликвидировать, а лишь сдерживать. Поэтому учет влияния АУПТ в формуле (16) простым домножением на вероятность отказа  $\bar{R}_{\text{АП}}$  является весьма формальным и не отражающим реальную значимость этой системы с точки зрения обеспечения эвакуации людей.

Кроме того, сам вид формулы (14) представляется неверным, так как при раскрытии скобок возникает член, квадратичный по вероятности обнаружения  $R_{\text{ОБН}}$ , что невозможно исходя из вида логического дерева событий на рис. 2 и следующих из него вероятностей отдельных сценариев. В качестве подтверждения приведем численные значения вероятности отказа системы противопожарной защиты: для указанных в [3] вероятностей срабатывания ( $R_{\text{ОБН}} = R_{\text{СОУЭ}} = R_{\text{ПДЗ}} = 0,8$ ) формула (14) дает вероятность отказа  $1 - P_{\text{ПЗ}} = (1 - R_{\text{ОБН}} \cdot R_{\text{СОУЭ}}) (1 - R_{\text{ОБН}} \cdot R_{\text{ПДЗ}}) = (1 - 0,8 \cdot 0,8) (1 - 0,8 \cdot 0,8) = 0,13$ , тогда как согласно рис. 2 одновременный отказ возможен либо при отказе системы обнаружения (с вероятностью  $1 - P_{\text{ОБН}} = 0,2$ , сценарий  $S_3$ ), либо при

срабатывании системы обнаружения, но одновременном отказе систем СОУЭ и ПДЗ (с вероятностью  $P_{ОБН} (1 - R_{СОУЭ})(1 - R_{ПДЗ}) = 0,8 (1 - 0,8)(1 - 0,8) = 0,032$ , сценарий  $S_4$ ), так что общая вероятность отказа составляет 0,232, что почти вдвое выше, чем дает формула (14). Расхождения будут еще более существенными при повышении надежностей систем: так, в предельном случае  $R_{СОУЭ} = R_{ПДЗ} = 1$  из рис. 2 следует естественный вывод о том, что вероятность отказа сразу двух систем СОУЭ и ПДЗ равна вероятности отказа системы обнаружения пожара  $1 - P_{ПЗ} = 1 - R_{ОБН} = 0,2$ , тогда как формула (10) дает неверный результат  $1 - P_{ПЗ} = (1 - R_{ОБН})^2 = 0,04$ .

Не менее острые вопросы возникают и при определении сценария, для которого производится расчет вероятности безопасной эвакуации  $P_э$  (см. (15) для подстановки в формулу (13)). В приложении 6 к методике [3] указывается, что на этапе предварительного анализа «производится экспертный выбор сценария или сценариев пожара, при которых ожидаются наихудшие последствия для находящихся в здании людей». Однако, по всей видимости, это касается расположения и характеристик очага пожара но не возможности срабатывания или отказа систем противопожарной защиты.

С одной стороны, поскольку риск есть произведение вероятности события на меру его последствий, для расчета  $P_э$  должен выбираться сценарий одновременного несрабатывания всех систем противопожарной защиты. Такой подход согласуется с пунктом 6.4 СНиП 21-01-97 [38], гласящим, что «эвакуационные пути в пределах помещения должны обеспечивать безопасную эвакуацию людей через эвакуационные выходы из данного помещения без учета применяемых в нем средств пожаротушения и противодымной защиты». С другой стороны, Технический регламент [5] явно указывает, что риск должен определяться «с учетом функционирования систем обеспечения пожарной безопасности» (статья 79). В методике [3] в явном виде не указано, какое состояние в расчетах должно задаваться для средств противопожарной защиты (рабочее, нерабочее), однако п. 22, касающийся порядка разработки дополнительных противопожарных мероприятий, гласит, что эффективность разрабатываемых «противопожарных мероприятий определяется степенью влияния на параметры  $t_p, t_{БД}, t_{НЭ}$ » а для

системы пожарной сигнализации, противодымной защиты и системы оповещения людей при пожаре и управления эвакуацией людей также условной вероятностью выполнения задачи при пожаре ( $R_{ОБН}, R_{СОУЭ}$  и  $R_{ПДЗ}$ )» [3]. Следовательно, расчеты предполагается проводить при *работающих* системах противопожарной защиты.

Данное противоречие свидетельствует о серьезной методологической ошибке методики [3], когда при расчете риска вероятность берется для одного события (отказ всех систем противопожарной защиты), а последствия — для другого, менее опасного (расчет эвакуации производится при работающих системах противопожарной защиты). Это недопустимо, поскольку в результате наименьшая вероятность сценария умножается на наименьшую вероятность безуспешной эвакуации. Получаемый результат никоим образом не может характеризовать реальный уровень пожарного риска на объекте.

В подтверждение сказанного рассчитаем пожарные риски по методике [3] в тех же предположениях, что использовались выше (см. раздел 3.4). При срабатывании всех систем противопожарной защиты эвакуация предполагалась успешной, поэтому примем в соответствии с формулой (15)  $P_э = 0,999$ . Система автоматического пожаротушения, как и ранее, не учитывается. На рис. 4а, б представлены двумерные столбчатые диаграммы, построенные для различных вероятностей срабатывания системы обнаружения пожара  $R_{ОБН}$ , равных 0,8 и 0,95 соответственно. Поскольку формула (16) содержит лишь произведение вероятностей отказов систем, результаты симметричны по обеим осям, а уменьшение риска с ростом надежности происходит значительно более резко, чем на рис. 3. Это происходит потому, что не учитываются сценарии с отказом только одной системы, которые с ростом надежности начинают превалировать над сценарием с одновременным отказом всех систем. Более низкие значения риска  $Q_B$  на рис. 4 по сравнению с рис. 3 не должны вводить в заблуждение. Во-первых, на рис. 3 и 4 приведены разные показатели риска, и, во-вторых, при расчетах по формуле (16) использовалась самая высокая вероятность успешной эвакуации. Использование в качестве  $P_э$  вероятности эвакуации для любого сценария, где происходит отказ

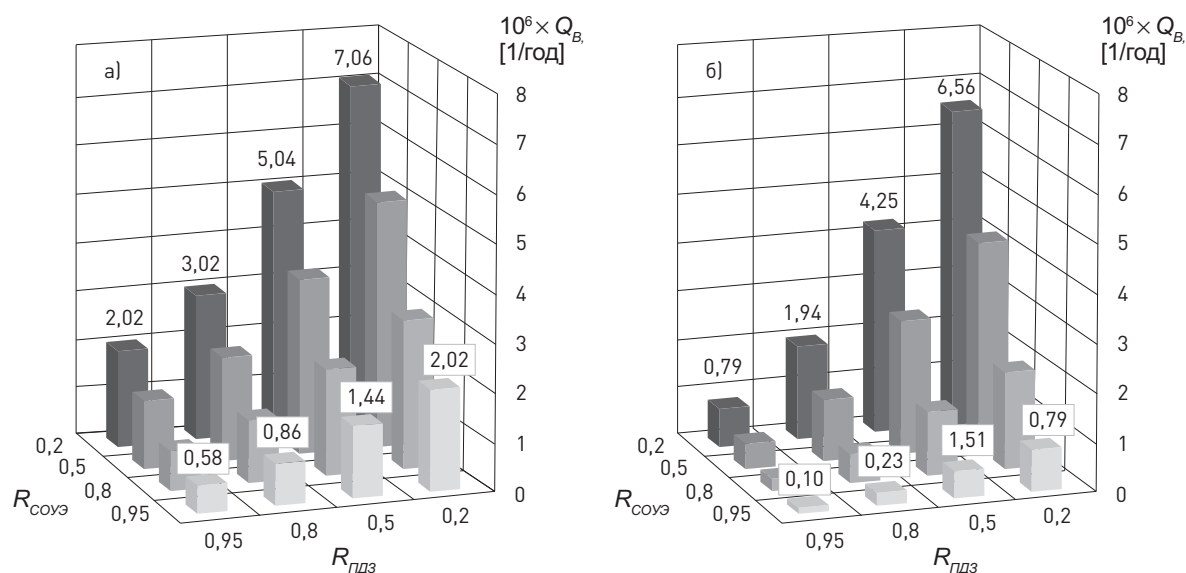


Рис. 4. Индивидуальный риск  $Q_B$ , рассчитанный по методике [3] при различных надежности систем противопожарной защиты: а)  $R_{ОБН} = 0,8$ ; б)  $R_{ОБН} = 0,95$

систем противопожарной защиты может на порядок повысить уровни риска  $Q_B$ .

Подводя итоги проведенного сопоставления отечественного и зарубежного подходов к оценке индивидуального пожарного риска для зданий, можно заключить, что методика, включенная в ГОСТы [17, 20] и принятая с некоторыми модификациями в [3], идет вразрез с общепринятым вероятностным анализом риска, с успехом применяющимся в других инженерных областях, в том числе для анализа опасностей в атомной, химической промышленности, пожаровзрывоопасности на наружных технологических установках и т. д. Более того, для пожаров в зданиях вероятностные методы на основе анализа логических деревьев с успехом применяются при оценке материального ущерба, эффективности средств противопожарной защиты и выбора их рациональных вариантов [39]. Для оценки же индивидуального риска исторически используются формулы, которым присущи рассмотренные выше недостатки. На наш взгляд, требуется серьезный пересмотр заложенной в [3] методологической основы вероятностной оценки индивидуального пожарного риска для зданий и обязательное использование таких ключевых элементов, как по-

строение и анализ различных сценариев с применением логических деревьев, оценка последствий каждого сценария и получение суммарного риска. При этом, в соответствии с идеологией объектно-ориентированного подхода, должны учитываться особенности, присущие периоду времени, в течение которого производится эвакуация (нестационарность пожара, поведение людей, возможность срабатываний или отказов одного или нескольких средств противопожарной защиты, существенная роль организационных мероприятий).

Отметим, что в методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [4], изданной, как и в методике [3], во исполнение Технического регламента [5], в разделе 4.2, касающемся расчета потенциального риска для зданий производственного объекта, указывается на необходимость рассмотрения совокупности сценариев развития пожара и суммирования риска по всем сценариям. Однако для каждого сценария определение риска по-прежнему основывается на формулах вида (11) и (12), так что высказанные выше возражения о неадекватности расчета риска перемножением вероятностей отказов технических систем остаются в силе. Кроме того, сам факт появления двух различных методик расчета риска

для зданий свидетельствует о необходимости устранения имеющихся в них противоречий.

Принятый в Российской Федерации Технический регламент [5] устанавливает необходимость обеспечения индивидуального пожарного риска на уровне не выше  $10^{-6}$  в год, то есть нормируется абсолютный риск. Как показывают оценки, для достижения этого показателя необходимо обеспечить снижение смертности людей на пожарах за год в десятки раз [36]. Оценка реалистичности данного показателя и требуемых для его достижения затрат выходит за рамки данной работы. Здесь же остановимся на проблемах, возникающих при вычислении абсолютных рисков.

Нормирование абсолютной величины допустимого индивидуального риска предполагает наличие надежной методики его количественной оценки. Как показывает обзор литературы в первой части работы [1], на данный момент наибольший успех в количественной оценке абсолютного пожарного риска достигнут для аварий на промышленных объектах, связанных с утечкой опасных веществ, в том числе сопровождающихся пожарами и взрывами. Для пожаров в зданиях вероятностные методы в основном применяются для оценки относительного риска, сравнения альтернативных решений противопожарных систем либо сравнения пожароопасности однотипных зданий.

Используя вероятностные методы для оценки абсолютного пожарного риска, следует четко представлять, что точность получаемого результата кардинально зависит от полноты и качества используемых статистических данных. Дополнительные неопределенности вносят ограничения и упрощения, присущие математическим моделям, закладываемые исходные данные и критерии поражающего действия пожара на людей. В литературе существует мнение, что при современном состоянии знаний в области пожарной безопасности неопределенности в вычислении риска намного выше, чем в других инженерных областях и зачастую оценка уровня риска по порядку величины вполне может считаться удовлетворительной [9]. Более того, в [40] высказывается мнение, что с повышением надежности технических средств противопожарной защиты решающую роль в обеспечении безопасности людей начинают играть организационные мероприятия.

Поэтому анализ риска можно адекватно провести лишь для существующих зданий, где известны результаты таких мероприятий (проводится ли инструктаж, учебные пожарные тревоги и т. п.).

Анализ зарубежной нормативной документации показывает, что абсолютные значения пожарного риска для зданий не устанавливаются, лишь формулируется список показателей, по которым можно оценивать риск для жизни и проводить сравнение либо относительных рисков для разных проектных решений, либо абсолютных рисков с существующими рисками в других областях жизнедеятельности. Для оценки риска для жизни людей такими показателями могут быть, например, уровень смертности на пожарах за год, число погибших на миллион населения страны (возможно, по разным группам населения), уровень смертности на пожарах в расчете на одно здание данного функционального назначения, частота пожаров с гибелью более определенно-го числа людей и т. д. [7].

Использование таких показателей дает более объективную картину, чем один только риск возникновения пожара с гибелью людей, нормируемый в [5]. Поэтому представляется необходимым при совершенствовании методики расширить спектр показателей пожарного риска, включив в их число такие величины, как ожидаемое число погибших на один пожар, ожидаемое число погибших в год на данном объекте, вероятность гибели на пожаре в расчете на одного человека (расчет данных показателей был подробно рассмотрен в разделах 3.1—3.4). Эти показатели допускают непосредственное сопоставление со статистическими данными, например по зданиям определенного функционального назначения, либо с обобщенными данными по потерям на пожарах за год как в нашей стране, так и за рубежом [41].

Кроме того, законодательно должны устанавливаться критерии приемлемости риска, однако абсолютные значения допустимого риска необходимо определять с учетом сложившейся социально-экономической ситуации в стране, рисков в других областях жизнедеятельности и т. п. Так, в проекте разрабатываемого в настоящее время Технического регламента «Общие требования к продукции, обеспечивающие защиту населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного

и техногенного характера» [42] критерий допустимости риска состоит в том, что показатели риска функционирующего объекта не должны превышать среднестатистических (фоновых) за последние 5 лет показателей риска чрезвычайных ситуаций на соответствующих территориях. Такой же подход мог бы быть использован и в области пожарной безопасности вместо во многом декларативного уровня риска ( $10^{-6}$  1/год), установленного Техническим регламентом [5].

#### 4. Заключение

Итак, в настоящей работе сопоставлены имеющиеся подходы к анализу пожарных рисков, а также рассмотрены методологические аспекты расчета индивидуального пожарного риска. На данном этапе, когда расчеты индивидуального риска входят в повседневную практику при проектировании новых объектов и оценке пожароопасности существующих объектов, чрезвычайно важно заложить правильный методологический базис использования вероятностных методов, учитывающий мировой опыт анализа риска, и избавиться от упрощенных подходов, не способных давать объективные данные для принятия проектных и эксплуатационных решений в области пожаробезопасности зданий.

Как показывает анализ литературы, вероятностный и эвристический подходы обладают своими сильными и слабыми сторонами, при этом взаимно дополняя друг друга. Вступивший в действие с 1 мая 2009 г. Технический регламент [5], казалось бы, однозначно делает выбор в пользу вероятностных методов, законодательно закрепляя предельно допустимый уровень абсолютного риска. Однако согласно тому же закону оценка риска является обязательной лишь для объектов, где не в полной мере выполнены требования пожарной безопасности, установленные нормативными документами по пожарной безопасности, или для которых эти требования отсутствуют. Для прочих же объектов, где оценка риска законодательно не требуется, все равно актуальной остается задача оценки возможных последствий пожара.

Важно иметь в виду, что Технический регламент [5] устанавливает предельное значение для индивидуального риска, т. е. нацелен на обеспечение своевременной эвакуации людей при пожаре. При этом,

однако, не затрагиваются вопросы о размерах материального ущерба, что чрезвычайно важно, например, при имущественном страховании от пожара [43]. Именно в этой области востребованными оказываются индексные методы либо комплексное использование индексных и вероятностных методов для особо сложных объектов.

К сожалению, в нашей стране индексные методы оценки пожарной опасности до настоящего времени не получили должного распространения. Первым шагом на пути создания и внедрения таких методов в практику оценки пожароопасности объектов могла бы стать адаптация существующих в мире индексных методов и соответствующего программного обеспечения для учета требований отечественной нормативной документации и реалий ситуации с пожарными рисками в стране с привлечением специалистов самого широкого круга — от исследователей и инженеров в области пожарной безопасности до лиц, на практике осуществляющих аудит и оценку пожарной опасности реальных объектов. Создание метода индексной оценки пожарного риска, который был бы принят всеми заинтересованными сторонами, представляется важным и актуальным в современных российских условиях.

#### Литература

1. Якуш С.Е., Эсманский Р.К. (2009). Анализ пожарных рисков. Часть I: Подходы и методы. Проблемы анализа риска, т. 6, № 3, с. 8—27.
2. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. (2002). Section 5, Fire Risk Analysis. — Quincy, MA: Nat. Fire Protection Association.
3. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. (2009). — Российская газета, № 161 (4985).
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. (2009). — М., МЧС России.
5. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Сборник законодательства Российской Федерации, 2008, № 30 (часть I), ст. 3579.
6. NFPA 551. (2007). Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments. — Quincy, MA: National Fire Protection Association.

7. SFPE Engineering Guide to Application of Risk Assessment in Fire Protection Design. (2006). — Bethesda, MD: Society of Fire Protection Engineers.
8. Rasbash, D., Ramachandran, G., Kandola, B. et al. (2004). Evaluation of Fire Safety. — N.Y.: J. Wiley & Sons.
9. Watts, J.M. (2002). Fire Risk Indexing. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Ch. 10. Section 5, Fire Risk Analysis, pp. 5-125 — 5-142. — Quincy, MA: National Fire Protection Association.
10. Hultquist, H., Karlsson, B. (2000). Evaluation of a Fire Risk Index Method for Multistorey Apartment Buildings. — Lund University, Sweden, Report No. 3088.
11. Karlsson, B. (2002). Fire Risk Index Method — Multi Storey Apartment Buildings. FRIM-MAB. Version 2.0. Tråtek, Rapport 0212053.
12. Evaluation en Vue de la Determination de la Grandeur des Compartiments Coupe-Feu. Note Explicative de Protection Incendie. (2007). VKF/AEAI, doc. 115-03f.
13. Брушлинский Н.Н., Есин В.М., Служев В.И. и др. (2006). Пожарные риски. Вып. 4. Управление пожарными рисками. Под ред. Н.Н. Брушлинского и Ю.Н. Шебеко. — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России.
14. De Smed, E. (2008). FRAME 2008. Theoretical basis and technical reference guide. <http://www.framemethod.net>.
15. Peacock, R.D.; Bukowski, R.W. (1990). Prototype Methodology for Fire Hazard Analysis. Fire Technology, 26, pp. 15-40.
16. Thompson, P.A.; Marchant, E.W. (1994). Simulex: Developing New Techniques for Modelling Evacuation. In: Fire Safety Science — Proceedings of the Fourth International Symposium, IAFSS, pp. 613-624.
17. ГОСТ 12.1.004-91\*. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
18. AIChE/CCPS. (1989). Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Assessment. — New York: Amer. Inst. Chem. Engineers.
19. TNO. (1992). Methods for the Calculation of Physical Effects Resulting from Releases of Hazardous Materials (Liquids and Gases) — TNO “Yellow Book”. 2<sup>nd</sup> Ed. — Voorburg, TNO.
20. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
21. Шебеко Ю.Н., Малкин В.Л., Смолин И.М. и др. (1999). Методы оценки поражающих факторов крупных пожаров и взрывов на наружных технологических установках. Пожаровзрывобезопасность, т. 8, №4, с. 18—28.
22. Болодьян И.А., Шебеко Ю.Н., Карпов В.Л. и др. (2006). Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. — М.: ВНИИПО МЧС России.
23. Акимов В.А., Быков А.А., Востоков В.Ю. и др. (2007). Методические рекомендации по определению количества пострадавших при чрезвычайных ситуациях техногенного характера. Проблемы анализа риска, т. 4, №4, с. 347—367.
24. Акимов В.А., Быков А.А., Востоков В.Ю. и др. (2007). Методики оценки рисков чрезвычайных ситуаций и нормативы приемлемого риска чрезвычайных ситуаций (Руководство по оценке рисков чрезвычайных ситуаций техногенного характера, в том числе при эксплуатации критически важных объектов Российской Федерации). Проблемы анализа риска, т. 4, №4, с. 368—404.
25. Purser, D.A. (2002). Toxicity Assessment of Combustion Products. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Ch. 6. Section 2, Fire Dynamics. — Quincy, MA: National Fire Protection Association, pp. 2-83 — 2-171.
26. Yung, D. (2008). Principles of Fire Risk Assessment in Buildings. — N.Y.: J. Wiley & Sons.
27. Proulx, G. (2002). Movement of People: Evacuation Timing. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Ch. 13. Section 3, Movement of People: Evacuation Timing. Quincy, MA: National Fire Protection Association, pp. 3-342 — 3-366.
28. International Fire Engineering Guidelines. (2005). — Australian Building Codes Board.
29. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. (2002). Section 3, Hazard Calculation. — Quincy, MA: National Fire Protection Association.
30. Холщевников В.В., Самошин Д.А. (2009). Эвакуация и поведение людей при пожарах. — М.: Академия ГПС МЧС России.
31. Свод правил СП 5.13130.2009 «Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования» (приказ МЧС России от 25.03.2009 №175).
32. BS-7346-4:2003. Components for smoke and heat control systems — Part 4: Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady-state design fires — Code of practice. — British Standards Institution.



33. PD-7974-7:2003. Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings — Part 7: Probabilistic Risk Assessment. — British Standards Institution.
34. Воробьев Ю.Л., Копылов Н.П. (2006). Проблема обеспечения пожарной безопасности в зданиях с массовым пребыванием людей. Пожарная безопасность, № 2, с. 113—124.
35. ГОСТ Р 51901.1-2002 (МЭК 60300-3-9:1995) Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.
36. Порошин А.А. (2004). Пожарная безопасность людей. Часть 1. От допустимого уровня до реальных статистик. Пожарная безопасность, № 1, с. 59—70.
37. Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М. и др. (2002). Надежность технических систем и техногенный риск. — М.: «Деловой экспресс».
38. Свод правил СНиП 21-01-97\*. «Пожарная безопасность зданий и сооружений».
39. Косачев А.А. (1995). Разработка метода выбора рациональных вариантов противопожарной защиты производственных объектов на основе вероятностного подхода. Дисс. кандидата технических наук. — М.: ВНИИПО.
40. PAS 79. (2007). Fire risk assessment — Guidance and a Recommended Methodology. — British Standards Institution.
41. Пожарные риски. Вып. 1. Основные понятия. (2004). Под ред. Н.Н. Брушлинского. — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России.
42. Проект Федерального закона о Техническом регламенте «Общие требования к продукции, обеспечивающие защиту населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (вторая редакция), интернет-ресурс [http://www.ampe.ru/doc/tech\\_reglament\\_2\\_v2.doc](http://www.ampe.ru/doc/tech_reglament_2_v2.doc).
43. Молчанов В. П. (2009). Научно-техническое обеспечение работы по сбору и анализу информации о зарубежных системах аудита безопасности. — Средства спасения. Противопожарная защита. Каталог, выпуск 9. — М.: Издательский дом ВДПО, с. 66—74.

## Сведения об авторах

**Якуш Сергей Евгеньевич:** доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ООО «Бюро пожарных исследований», 109029, г. Москва, Сибирский проезд, д. 2, стр. 9; Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН); 119526, г. Москва, пр. Вернадского, 101, корп. 1.

65 публикаций по горению, взрыву, промышленной и пожарной безопасности, математическому моделированию пожаров, взрывов, многофазных течений.

*Контактная информация:*

Тел.: (495) 434-95-25 (р.), (916) 590-34-17(моб.),

E-mail: yakush@ipmnet.ru

**Эсманский Рустам Кимович:** инженер-механик, генеральный директор ООО «Бюро пожарных исследований», 109029, г. Москва, Сибирский проезд, д. 2, стр. 9.

Область интересов: пожарная безопасность, противодымная защита, вентиляционное оборудование.

8 публикаций по внутренней аэродинамике автомобилей, вентиляционному оборудованию, расчетам систем противодымной защиты и компьютерному моделированию пожаров, 50 патентов и авторских свидетельств на изобретения и полезные модели по автомобильным системам и вентиляционному оборудованию.

*Контактная информация:*

Тел.: (495) 679-85-00 (р.), (903) 729-83-24 (моб.),

E-mail: novik\_n@list.ru