ПЕРКОЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Е.Ю. Мирясов;
М.Т. Аманбаев;
Ю.Д. Моторыгин, доктор технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Проведен анализ чрезвычайных ситуаций на промышленных объектах. Показано, что возникновение и распространение чрезвычайных ситуаций является сложным процессом, зависящим от множества факторов. Традиционно существуют детерминированные модели (интегральные, зональные, полевые), которые описывают процессы развития чрезвычайных ситуаций. Кроме традиционных моделей, в последнее время получили распространение недетерминированные математические модели. В статье показано практическое использование перколяционной модели анализа чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, математические модели, перколяционная модель, природная среда

PERCOLATIONNY MODEL OF THE DESCRIPTION OF EMERGENCY SITUATIONS DEVELOPMENTS

E.Yu. Miryasov; M.T. Amanbaev; Y.D. Motorygin.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The analysis of emergency situations on industrial targets is carried out. It is shown that occurrence and distribution of emergency situations is the difficult process depending on set of factors. Traditionally there are determined models (integrated, zone, field) which describe developments of emergency situations. Except traditional models, recently were extended not determined mathematical models. In article practical use перколяционной is shown model of the analysis of emergency situations.

Keywords: environment, research of ignition process, special fireproof means

В настоящее время аварии на современных промышленных предприятиях становятся сравнимы с природными катаклизмами, а в ряде случаев даже способствуют их возникновению. При этом масштаб аварий в промышленности обусловлен чаще не природными причинами, а человеческим фактором. К таким факторам относятся:

– интенсификация, связанная с ростом технологических параметров (температуры, давления, энергонасыщенности, содержания опасных веществ), приводящая к постоянному возрастанию мощности единичных объектов (блоков, аппаратов, установок и т.д.);

– комплексная переработка сырья, ведущая к концентрации на единой площадке различных производств и соответственно опасностей разной природы;

– модернизация технологий, обостряющая противоречия между темпом научно-технического прогресса и проблемами обучения персонала.

Для современного промышленного производства характерна высокая концентрация опасностей (особенно это характерно для нефтеперерабатывающей отрасли). При производительности нефтепереработки до 10 млн т нефти в год следует, что единовременно на площадке (площадью от 0,5 до 2 км^2) промышленного предприятия содержится

от 300 до 500 тыс. т углеводородного топлива, энергосодержание которого эквивалентно приблизительно 3–5 мегатоннам тротила.

Детерминированные модели развития чрезвычайных ситуаций (интегральные, зонные и полевые) вводят большое количество допущений, усреднений и приближений, чтобы с помощью дифференциальных уравнений приближенно описать процесс распространения опасных факторов [1].

Развитие чрезвычайных ситуаций можно исследовать на решетках, покрывающих исследуемую область, с использованием марковских моделей. Однако часто требуется проанализировать связь развития процессов распространения опасных факторов с физическими особенностями окружающей среды. Для этого рассмотрим физические закономерности развития чрезвычайных ситуаций с помощью решетки, рассматривая процесс распространения (протекания) опасных веществ сквозь определенную среду [2–4]. Такой процесс протекания называется перколяцией (от англ. percolation – просачивание).

Явление перколяции (или протекание через среду) применительно для развития, в частности процесса горения, можно определить:

– средой, в которой наблюдается это явление (пожарной нагрузкой);

– источником зажигания, который определяет начальный процесс протекания в этой среде;

– способом протекания среды, который зависит от окислителя, поддерживающего горение (окислительно-восстановительную реакцию).

Обычно [1, 2] перколяционную модель рассматривают для решеточной системы, хотя она может быть применена к произвольным сетям, конечным и бесконечным графам и т.д.

При классическом подходе [2] обычно рассматривают бесконечную квадратную решетку, узлы которой «заняты» независимо друг от друга некоторыми объектами с вероятностью $p<1$. В роли таких объектов могут выступать картонные кубики, деревья, дачные домики, автомобили на стоянке, структурированная пожарная нагрузка и т.д. Доля не занятых («пустых») узлов решетки равна 1-p. При этом требуется определить: образуют ли занятые узлы непрерывный путь от нижнего края решетки до верхнего. Непрерывным считается путь, соединяющий один занятый узел решетки с соседним занятым узлом решетки (соседями данного узла считаются узлы, расположенные в непосредственном соседстве от него к северу, югу, востоку или западу.) Если такой путь существует, то говорят, что решетка перколирует. Наименьшая плотность x занятых узлов, при которой бесконечная решетка перколирует, является критической плотностью или порогом перколяции x_c. Расчеты по методу Монте-Карло [4] для бесконечной квадратной решетки дают значение порога перколяции $x_c \approx 0{,}59275$.

При исследовании перколяции вводится понятие кластера, под которым понимается совокупность связанных узлов. Ими могут быть как удаленные (блокированные) узлы, так и узлы, участвующие в передаче огня. Если $x<x_c$, то в системе есть только кластеры из конечного числа узлов, и поэтому развитие пожара будет локализовано, и горение прервется. При $x>x_c$ обязательно появятся узлы, принадлежащие бесконечному кластеру. Этот бесконечный кластер обеспечит отличную от нуля и независящую от размеров системы удельную величину распространения огня $\sigma(x)$.

Рассмотрим функцию $P(x)$ и отношение $\sigma(x)/\sigma(1)$, где $\sigma(1)$ – распространение огня при $x=1$, то есть без блокированных узлов. Для конечной сетки любого размера обе функции обращаются в ноль в одной и той же точке, которая была названа (для конечного кластера) порогом протекания, а при бесконечном увеличении сетки обозначает точку, где возникает бесконечный кластер (рис. 1).

Приведенный график иллюстрирует перколяцию не плоской сетки, а объемной (трехмерной) решетки. Для плоской решетки значение x_c было бы равно 0,59. Для простой кубической решетки $x_c=0{,}31$.

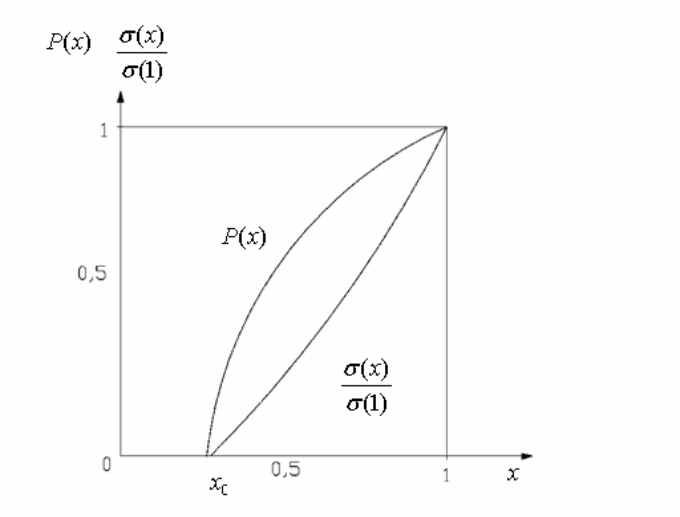

Рис. 1. **Графики функций P(x) и σ(x)/σ(1), при этом функции обращаются в ноль в одной точке**

В результате исследования перколяционных процессов [2, 4] были установлены эмпирические зависимости вида:

$$P_{CK}(x) = k(x - x_C)^{2\nu},$$

где $P_{ск}(x)$ – функция, представляющая долю узлов, принадлежащих скелету бесконечного кластера; v – эмпирический коэффициент; k – коэффициент пропорциональности.

Приведенную зависимость можно представить в виде отношения:

$$\frac{P_{CK}(x)}{P(x)} = k(x - x_c)^{\nu - \beta}$$

в двумерном случае, а в трехмерном случае:

$$\frac{P_{CK}(x)}{P(x)} = k(x - x_c)^{2\nu - \beta},$$

где β – эмпирический коэффициент для зависимости P(x).

При исследовании проводимости двумерных и трехмерных сеток с блокированными узлами экспериментально найдено [2], что удельная величина распространения огня подчиняется закону:

$$\sigma(x) = \sigma_0 (x - x_0)^t,$$

где множитель σ_0 равен удельной величине распространения огня без блокированных узлов. Величина t называется критическим индексом величины распространения огня. Установлено, что для двумерных сеток t=1,3, а для трехмерных t=1,6÷1,7.

Рассмотренные в уравнениях индексы P, v, β, t описывают критическое поведение различных величин в окрестности порога протекания. Для каждого из индексов существует два значения, для двумерной и трехмерной задач. Согласно современным представлениям, критические индексы для всех задач в пространстве с одной размерностью одинаковы.

Постоянство критических индексов связано с тем, что они определяются структурой кластеров в окрестности порога протекания. Основную роль в этом случае играют геометрические свойства кластеров, проявляющиеся на значительных расстояниях по сравнению с размерами элементарной ячейки. Поэтому геометрия кластеров не зависит от того, на какой решетке задана задача. Задача может быть задана вообще на узлах, расположенных случайным образом в пространстве, и это не повлияет на значение критических индексов. Однако размерность пространства сильно сказывается на геометрии кластеров. По этим причинам критические индексы не зависят от типа задачи, но зависят от размерности пространства.

Пороги протекания существенно зависят от типа задач, а критические индексы обладают определенной универсальностью. Следовательно, если результаты физического эксперимента трактуются с помощью теории перколяции, а микроскопическая структура исследуемой системы не вполне адекватна, то следует сравнивать критические индексы, так как для пространства одной размерности они фактически не от чего не зависят.

Таким образом, теория перколяции позволяет связать очень большое количество объектов при условии, что связь каждого объекта со своими соседями носит случайный характер, но при этом задается вполне определенным способом (например, с помощью генератора случайных чисел, обладающего конкретными свойствами).

Различные задачи теории протекания объединяются тем, что геометрия связанных элементов вблизи порога перколяции у них одинакова. Универсальная крупномасштабная геометрия позволяет использовать универсальные свойства физических величин, зависящих от структуры больших кластеров. Это и объединяет основные задачи теории протекания (рис. 2).

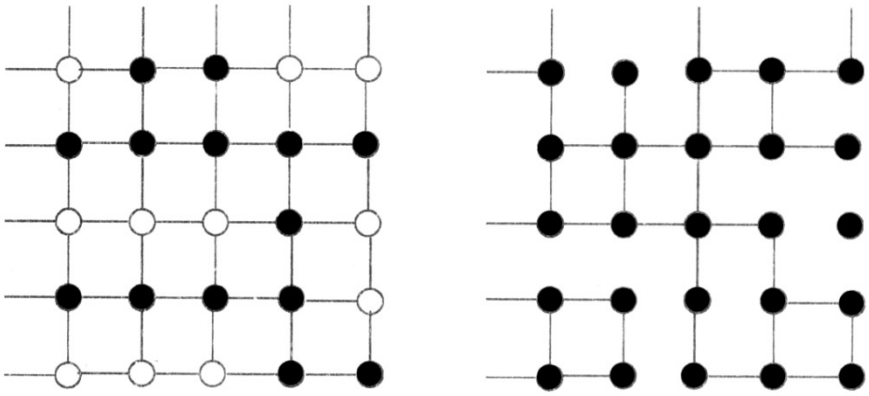

Рис. 2. **Примеры перколяции на решетках узлов и связей**

Для примера рассмотрим распространение лесного пожара на симметричной диагональной решетке. На рис. 3 показана диагональная решетка, имеющая единственную точку начала процесса распространения пожара и точку достижения окончания горения при условии отсутствия тушения. Графически это можно изобразить следующим образом.

Такое распространение пожара может быть представлено в виде дерева и соответственно соотнесено при определенных приближениях с марковской цепью.

Рассмотрим следующую решетку с направленным распространением и идентифицируем все узлы (рис. 3). При предположении, что связи эквивалентны можно рассчитать времена достижения процессом любого узла. Вероятности достижения представлены на рис. 4. В скобках указаны вероятности достижения состояния. Финальные вероятности марковских процессов для различных симметричных квадратных решеток показаны на рис. 5.

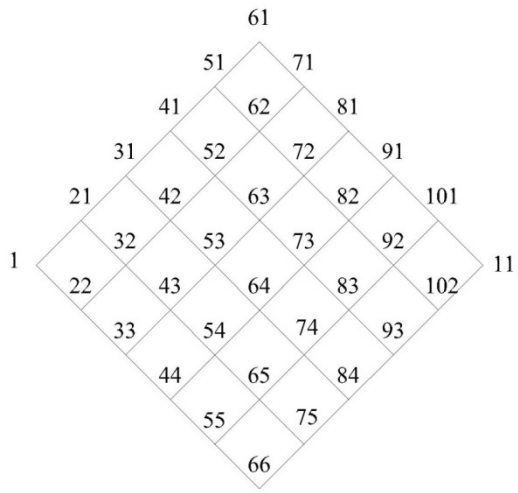

Рис. 3. **Диагональная решетка со всеми идентифицированными узлами**

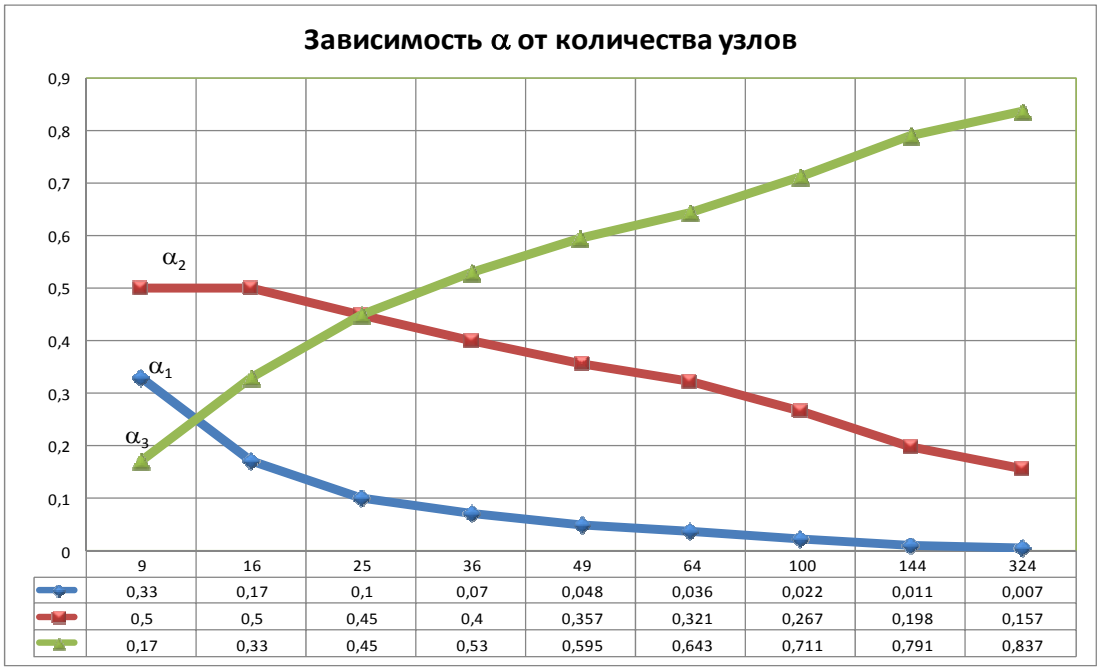

Рис. 4. **Зависимости финальных вероятностей марковских процессов для различных симметричных квадратных решеток**

Таким образом, распространение марковского процесса на конечных перколяционных решетках показывает, что с ростом количества узлов симметричной решетки вероятность финального нахождения процесса в вершинах решетки стремиться к нулю, установление в центральных узлах возрастает. Это объясняется тем, что узловые узлы имеют постоянное значение, а количество внутренних узлов возрастает в квадратичной зависимости.

Проведем нормирование коэффициентов вероятности финального нахождения процесса в одном из трех рассматриваемых узлов. Пусть

$$\overline{\alpha}_1 = \frac{1}{n}\alpha_1,\ \overline{\alpha}_2 = \frac{1}{m}\alpha_2,\ \overline{\alpha}_3 = \frac{1}{k}\alpha_3,$$

где n – количество узлов первого типа; m – количество узлов второго типа; k – количество узлов третьего типа. Тогда условие нормировки финальных вероятностей, отнесенных к одному узлу, принимает вид:

$$1 = n\overline{\alpha}_1 + m\overline{\alpha}_2 + k\overline{\alpha}_3 .$$

Зависимости нормированных финальных вероятностей марковских процессов для различных симметричных квадратных решеток показаны на рис. 5, 6.

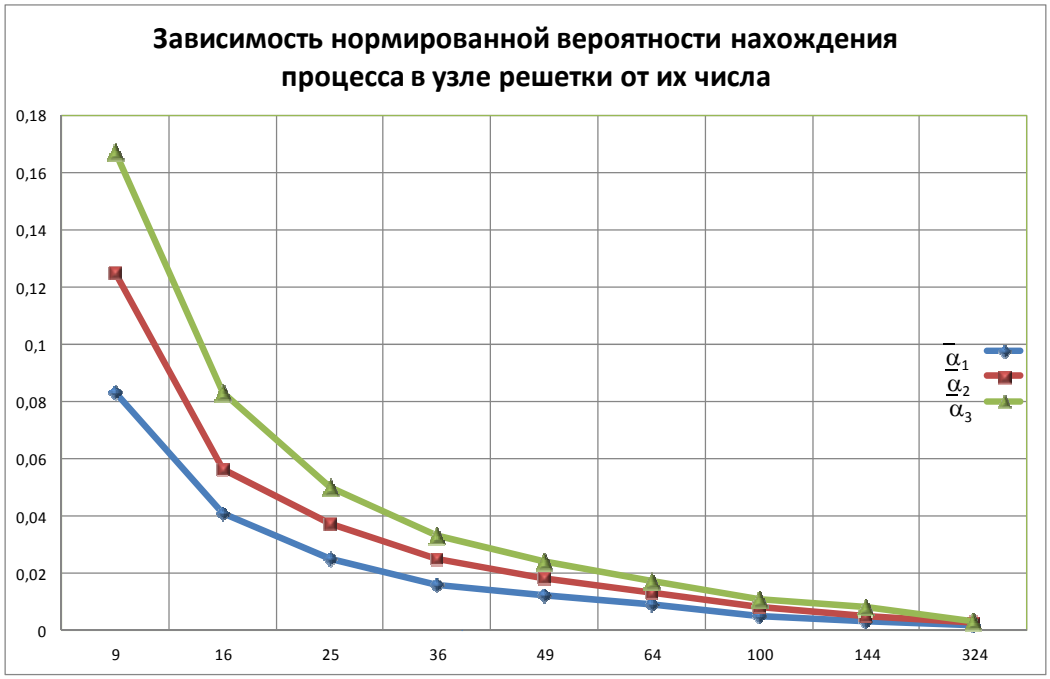

Рис. 5

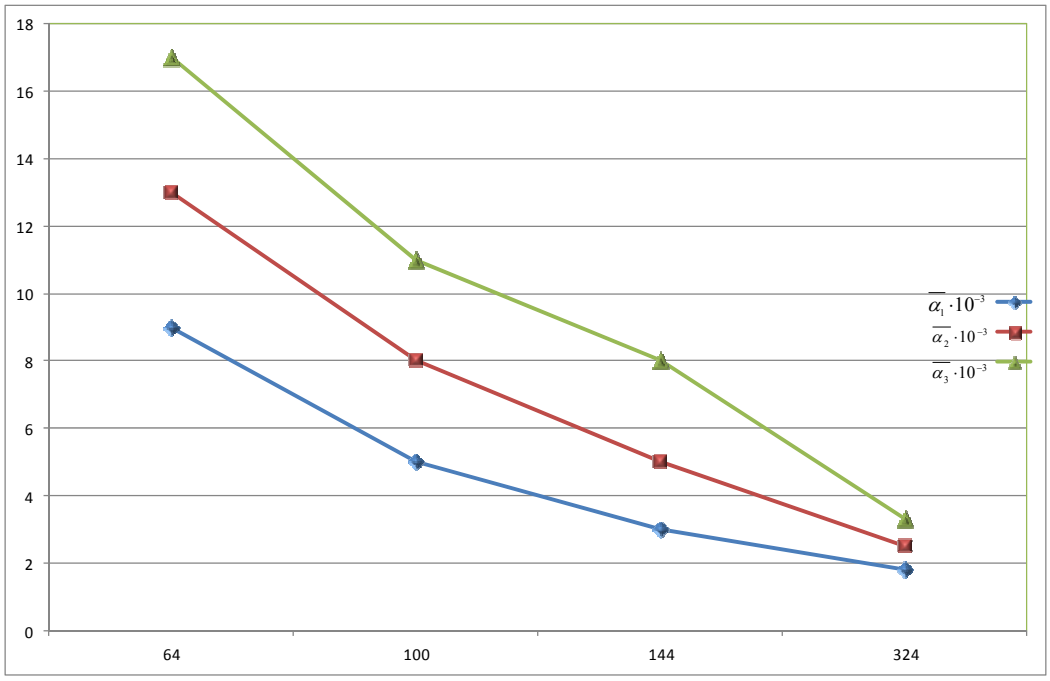

Рис. 6. **Зависимости нормированных финальных вероятностей марковских процессов для различных симметричных квадратных решеток**

Графические зависимости финальных вероятностей марковских процессов для различных симметричных квадратных решеток можно интерпретировать как структуру пожарной нагрузки в каждом типе узла. Поскольку для решеток существует предположение об эквивалентности связей, то их одинаковую огнепроводимость обеспечивает разное количество пожарной нагрузки. Для узлов с двумя связями пожарная нагрузка меньше, чем для узлов с тремя, которая в свою очередь меньше, чем для узлов с четырьмя связями. Следовательно, для решеточных моделей пожарную нагрузку в пространстве можно моделировать количеством связей, выходящих из узла, который характеризует её положение в пространстве.

В бесконечной системе порог перколяции является четко определенным, причем он не зависит от того, какая случайная последовательность блокированных узлов использовалась в эксперименте. В конечной системе такого четкого порога не существует, а имеется критическая область с определенной шириной, в которую попадают значения X_c, полученные в большинстве экспериментов с различными случайными последовательностями. С увеличением размеров системы границы этой области сужаются.

На симметричных решетках, если все связи целые, то каждый узел связан Z числом связей с другими узлами. В таблице показано [2], что для плоских решеток с погрешностью меньше чем 10 % справедливо:

$$ZX_{св}= 2,$$

а для объемных решеток:

$$ZX_{св}=1,5.$$

Таблица. **Зависимость $ZX_{св}$ для различных решеток**

Тип решетки	$x_{СВ}$	$x_у$
Треугольная	0,3473	0,5000
Квадратная	0,5000	0,5900
Шестиугольная	0,6527	0,7000

Таким образом, порог перколяции зависит от количества связей между узлами решеток.

Для решения данной задачи используется решеточная модель. Рассматривается решетка, состоящая из узлов и связей между ними. Каждому узлу задается число $p_{i,j}$ в интервале [0; 1], которое характеризует вероятность того, что в данную ячейку может просочиться огонь. Задается пороговое значение вероятности $p_П$ (при X_c=0,5927), которое определяет нижнее значение вероятности, при котором опасные факторы все еще могут протечь в ячейку (рис. 2).

Ячейки, с вероятностями меньшими пороговой, способны гореть и пропускать сквозь себя огонь. Условием успешного распространения огня является возникновение кластера, который простирался бы вдоль всей решетки и соединял бы ее противоположные стороны.

Если плотность занятых узлов меньше порога перколяции, то пожар затухнет прежде, чем огонь достигнет противоположного края объекта. При плотности занятых узлов больше порога перколяции огонь достигнет противоположного края объекта, уничтожив практически весь объект.

В приведенном примере была рассмотрена равномерно структурированная природная среда, когда протекание процесса из начального узла в конечный всегда возможно. Однако чаще всего среда распространения опасных факторов располагается случайным образом. При некотором сосредоточении опасных факторов возможно прекращение развития чрезвычайной ситуации из-за большого расстояния между сосредоточением материала,

способного поддерживать их распространения. Задача теории перколяции позволяет найти минимальную величину концентрации среды, при которой процесс развития чрезвычайной ситуации продолжается.

Литература

1. Расследование пожаров: учеб. / В.С. Артамонов. СПб., 2007. 500 с.

2. Broadbent S.R., Hammersley J.M. Percolation Processes, 1, Crystals and Mazes: Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1957. С. 629–641.

3. Моторыгин Ю.Д. Математическое моделирование процессов возникновения и развития пожаров: монография / под общ. ред. В.С. Артамонова. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2011.

4. Abdulaliev F.A., Motorygin Y.D. Description of fire development by percolation models: Proceedings international scientific conference: Safety engineering (Fire, Environment, Work environment, Integrated risk). Novi Sad, Republic Serbia, 2010. P. 563–567.