

# Методологические основы автоматизации процесса контроля пожарной опасности транспортных средств

В. Н. КРУГЛЕВСКИЙ, докт. техн. наук, доцент,

Д. А. СКОРОХОДОВ, докт. техн. наук, профессор, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко, Санкт-Петербург



**Разработан новый метод автоматизации контроля пожарной опасности в помещениях транспортных средств, состоящий в имитационном моделировании развития пожарных ситуаций на базе теории клеточных автоматов. Реализация метода в системах контроля пожарной опасности позволит обнаруживать пожарообразующие процессы на ранних этапах их зарождения и предотвращать возникновение и развитие пожаров.**

зажигания хотя потенциально и присутствуют в помещении, но бездействуют: нет повышенных нагревов воздушной среды и механизмов, отсутствуют искры, короткие замыкания. Как при нормальном состоянии помещения, так и на начальных этапах процесса формирования и развития пожароопасной ситуации можно считать, что содержание кислорода в воздушной среде практически не изменяется. В то же время параметры горючих веществ и источников зажигания изменяются и находятся в определенной взаимосвязи.

Транспортные средства морского, речного, железнодорожного, авиационного транспорта как пожароопасные объекты представляют собой, в большинстве случаев, пространственные системы множества различных по назначению помещений с достаточным для возникновения и развития пожара количеством горючих веществ, окислителя (кислорода воздуха) и потенциальных источников зажигания (нагретые поверхности механизмов, неисправности электрооборудования, открытое пламя и др.) [1; 2].

Известно, что, независимо от первоначальной причины, пожар возникает, если в помещении в определенный момент создаются условия контакта горючего, окислителя и источника зажигания в достаточном количественном соотношении (рис. 1).

При нормальном состоянии помещения газообразные и жидкие горючие вещества находятся в пределах своих технологических систем, а твердые горючие материалы имеют температуру,

при которой исключается выделение каких-либо летучих веществ, окиси углерода, метана и других углеводородов, способных воспламеняться. Источники



Рис. 1. Условия возникновения очага пожара

Рис. 2. Горючие вещества и источники зажигания: структура взрывопожароопасной нагрузки судна



**Рис. 3. Горючие вещества и источники зажигания: судовые источники зажигания**

Образование такого опасного контакта исключено во всех помещениях транспортного средства при нормальной работе его систем, технических средств и оборудования. Это обеспечивается как соответствующими проектными решениями, так и правильной эксплуатацией объекта.

В качестве примеров на схемах (рис. 2, 3) представлены горючие вещества и источники зажигания, характерные для судовых помещений.

Функционирование технических средств, находящихся внутри помещения, в результате возникновения и развития аварийного происшествия, может выходить за границы нормальных параметров и приводить к так называемым пожароопасным состояниям помещения с наличием в нем контакта горючего, окислителя и источника зажигания. Переход помещения из состояния нормального функционирования в состояние наличия в нем опасного контакта горючего, окислителя и источника зажигания можно рассматривать как процесс формирования пожароопасной ситуации, которая, в случае непринятия противодействующих мер, неизбежно приводит к возникновению пожара.

### Этапы развития пожара

В соответствии с принятыми теоретическими представлениями весь процесс возникновения и развития пожара условно можно разделить на отдельные этапы [3]:

- пожароопасная ситуация;
- предпожарная ситуация;
- возгорание;
- пожар;
- объемный пожар;
- распространение пожара в смежные помещения.

Каждому из этапов присущи определенные признаки и степень ущерба.

Пожароопасная ситуация характеризуется наличием горючих материалов и окислителя, находящихся в контакте, и появлением источника зажигания достаточной мощности (физико-химические процессы, связанные с воздействием теплоты на горючую систему, в данном случае еще не начинаются).

На этапе предпожарной ситуации отсутствует пламенное горение, под воздействием нагрева происходит пиролиз твердых горючих веществ, испарение воспламеняющихся жидкостей с образованием горючих паров, выделение горючих газообразных веществ в объем помещения, искрение и появление электрических дуг у электрооборудования и т. п. Последствия этой ситуации для транспортного средства минимальны.

Возгорание начинается с возникновения пламенного горения и развивается до момента образования значительного очага горения (несколько квадратных метров). На этом этапе происходит медленное изменение среднеобъемной температуры помещения, так как выделяемая в очаге горения теплота идет главным образом на нагрев воздуха и горючих материалов. Последствия этой аварийной ситуации для транспортного средства незначительны.

Этап пожара характеризуется интенсификацией горения. При этом резко увеличивается и воздействие всех опасных факторов пожара (температуры, избыточного давления, содержания вредных примесей). Площадь горения, скорость выгорания материалов, интенсивность газообмена также значительно возрастают. Ущерб от этой аварийной ситуации для транспортного средства значителен и обусловлен выходом из строя части функционально связанного между собой оборудования различных систем. Начиная с этого этапа возможны человеческие жертвы.

На этапе объемного пожара происходит распространение пламени по всем поверхностям помещения. Последствия этой ситуации настолько значительны, что при наличии в помещении функционально значимого оборудования происходит частичная или полная потеря управления транспортным средством.

Этап распространения пожара в смежные помещения характеризуется проникновением продуктов горения в виде пламени и дыма через конструк-

ции транспортного средства, граничащие с аварийным помещением. Наносимый ущерб в этом случае следует определить как катастрофический: пожар на данном этапе может привести к выходу из строя транспортного средства и полной непригодности его для восстановления.

Следует отметить, что не всегда можно провести четкую грань между этапами. В некоторых случаях интервал времени между первым и последним этапами может быть чрезвычайно малым (несколько секунд), в других же условиях процесс может развиваться медленно и долго оставаться в состоянии третьей стадии.

### Способ контроля развития пожара: ключевые составляющие

Наибольшую значимость с точки зрения предотвращения развития пожара имеет обнаружение процесса возникновения очага возгорания на этапах пожароопасной и предпожарной ситуаций.

Будем исходить из того, что в пространстве транспортного средства горючие вещества и источники зажигания могут вступать в контакт только в специально предназначенных для этого местах (например, в камере сгорания энергетической установки), при этом пожарная безопасность обеспечивается за счет нормально функционирующего оборудования, грамотного обслуживания и правильного управления. Правила пожарной безопасности учитываются при проектировании транспортного средства, а затем выполняются при его постройке и эксплуатации. Нарушить их может только авария, связанная с разрушением оболочек, которые ограничивают технологические перемещения жидких и газообразных горючих веществ или изолируют нагретые до высоких температур элементы оборудования и источники открытого пламени, способные стать источниками зажигания. В результате подобных аварий происходит непредусмотренное распространение горючих веществ по помещению, которое заканчивается их контактом с каким-либо источником зажигания и возникновением очага пожара.

Учитывая вышесказанное, пожарную опасность при изменении обстановки в помещении транспортного средства можно контролировать следующим способом [4]:

- распознать нештатную ситуацию в помещении, в первую очередь устано-

**Таблица. Характеристика ИЗ и ГМВ с точки зрения стационарности/мобильности**

Группы ИЗ и ГМВ		Размещение ИЗ и ГМВ в помещениях		
		Стационарное	Переменное	
			Перемещаемые принудительно	Перемещающиеся произвольно
ИЗ	Нагретые поверхности	+	+	+ при взрыве
	Электрооборудование и электросети	+	+	+ при коротком замыкании
	Открытое пламя	+	+	+ при пожаре
ГМВ	Твердые	+	+	—
	Жидкие	+ при наличии герметичной оболочки		?
	Газообразные			

вить контроль за перемещением и состоянием всех горючих материалов и веществ (ГМВ) и потенциальных источников зажигания (ИЗ);

- далее при распознавании факта изменения обстановки в помещении спрогнозировать изменение состояний ГМВ и ИЗ, а также новые координаты в пространстве помещения, которые они могут занять;
- зная новые координаты ГМВ и ИЗ, определить, появились ли зоны, в которых происходит (или может происходить) их контакт;
- если ГМВ и ИЗ вступили или могут вступить в контакт, сравнить температуру воспламенения (тления, вспышки и т. п.) ГМВ и температуру ИЗ;
- в случае, если температура ИЗ окажется больше температуры воспламенения ГМВ, сигнализировать о факте возникновения и координатах очага возгорания.

Появление зоны контакта ГМВ и ИЗ, способного привести к образованию очага возгорания, и является фактом возникновения пожароопасной ситуации в помещении.

**Принципы определения местоположения и перемещения ИЗ и ГМВ**

Особенность вышеописанного способа контроля развития пожара заключается в определении текущих координат и прогнозировании перемещений ИЗ и ГМВ друг относительно друга, а также проверки возможности ИЗ поджечь ГМВ.

ИЗ и ГМВ могут размещаться стационарно, перемещаться принудительно или самопроизвольно, что отражено в таблице.

Определение местоположения стационарных ИЗ и ГМВ не вызывает трудностей. Их координаты соответствуют данным, указанным в проектной документации на транспортное средство. Траектории принудительных перемещений ИЗ и ГМВ, предусмотренные технологическими процессами, также

должны быть определены при проектировании. Если перемещение инициирует или совершает человек, в этом случае, по крайней мере, имеется возможность определить если не траекторию перемещения, то конечное местоположение перемещенных ИЗ и ГМВ.

Самопроизвольное перемещение ИЗ в виде нагретых поверхностей в помещении транспортного средства возможно лишь в случае серьезной аварии (часто в результате взрыва), связанной с разрушением конструкции, элементом которой является нагретая поверхность. Подобные аварии определяются другими способами контроля транспортного средства.

Произвольное перемещение электрооборудования и электросетей возможно только при коротком замыкании (КЗ) в электрической цепи, а открытое пламя свободно перемещается при возникновении очага возгорания (пожара). КЗ может произойти исключительно в кабеле, находящемся под напряжением. Кабельные сети можно отнести к стационарным элементам насыщения транспортного средства, поэтому координаты ИЗ в виде КЗ будут соответствовать координатам аварийного участка электросети.

Жидкие и газообразные ГМВ могут занимать стационарное положение или принудительно перемещаться, только находясь в герметичной оболочке. Пока оболочка не нарушена, определять их расположение можно так же, как с случае с твердыми ГМВ.

Самопроизвольное перемещение твердых ГМВ в пространстве транспортного средства может произойти только в результате аварии или в случае нарушения эксплуатационных правил. При этом на характер перемещения твердых ГМВ влияют сила тяжести, силы инерции, характеристики материала ГМВ (прочность, плотность, шероховатость поверхности), форма, способ крепления, характер разрушения устройства крепления и многое другое. Поэтому для определения зон, в грани-

цах которых могут переместиться твердые ГМВ, целесообразно использовать метод экспертных оценок.

Для прогнозирования самопроизвольного (свободного) перемещения жидких и газообразных ГМВ в помещениях требуется осуществлять моделирование протекающих процессов с использованием законов гидроаэродинамики. Но определение возможных границ распространения жидкостей и газов в пространстве помещений транспортного средства без учета скорости их распространения позволяет упростить расчеты. В этом случае основной проблемой становится определение количества (объема) жидкого или газообразного ГМВ, поступающего в помещение.

**Имитационное моделирование развития пожароопасных ситуаций**

Что касается тепловых полей, то они, как и поля любого вида, относятся к классу пространственно распределенных физических систем. Теория подобных систем развита в рамках математической физики на базе дифференциальных уравнений в частных производных. Подобные уравнения не могут быть решены только аналитическим путем. Их анализ обычно требует сочетания современных аналитических методов с большими сериями компьютерных расчетов. Более того, при наличии нескольких нетривиальных источников тепла и сложной нелинейной среды, определяемой помещениями транспортного средства, насыщенными энергетическим оборудованием, решения этих уравнений становится делом если и возможным в принципе, то практически бесполезным.

В связи с этим предлагается использовать качественно иной подход к решению задач расчета тепловых полей и распространения ГМВ. Сущность его заключается в том, что вместо традиционного составления и численного решения дифференциальных уравнений выполняется прямое имитационное моделирование процессов на базе клеточных автоматов (КА). При этом целесообразно применять методы, разработанные в рамках теории клеточных автоматов Дж. фон Неймана [5, 6, 7].

Используя КА, можно осуществить прямое компьютерное моделирование различных процессов с локальными взаимодействиями — для этого нужно только подобрать соответствующий закон отображения, позволяющий по состояниям самого элемента (клетки) и

его ближайших соседей определять состояние этого элемента в следующий (дискретный) момент времени.

Модель помещения транспортного средства будет представлять собой пространственную структуру КА. На рис. 4 представлен фрагмент модели в виде одного единичного объема с координатами  $ijk$  в трехмерном пространстве и шести его ближайших соседей. Для наглядности они изображены на некотором расстоянии друг от друга, хотя на самом деле непосредственно соприкасаются. Стрелками условно обозначены их входы и выходы.

Состояние каждого единичного объема пространства помещения может изменяться во времени. Каждый отдельно взятый единичный объем также можно считать динамической системой и представить как математический объект вида

$$D = \langle \tau, M, R, T, Z, u \rangle.$$

где  $\tau$  — множество моментов времени;  
 $M$  — структурно-пространственная характеристика, в которой учитывается, что у каждого клеточного автомата есть шесть соседей;  
 $R$  — характеризует состояние вещества, если оно находится в единичном объеме;  
 $T$  — характеризует температуру единичного объема;  
 $Z$  — состояние единичного объема в плане пожарной опасности;

$Z = f(R, T) = \begin{cases} 1 & \text{— пожарная опасность} \\ 0 & \text{— нет пожарной опасности;} \end{cases}$   
 $u$  — характеризует взаимодействие клеточного автомата с его ближайшими соседями

$$\Delta_{i,j,k}^{n+1} = f(u(\Delta_{i,j,k}^n))$$

$$u(\Delta_{i,j,k}) = \{\Delta_{i,j,l,k} \in M : |\Delta_{i,j,k} - \Delta_{i,j,l,k}| = 1\} \text{ или}$$

$$u(\Delta_{i,j,k}) = \{\Delta_{i+1,j,k}, \Delta_{i-1,j,k}, \Delta_{i,j+1,k}, \Delta_{i,j-1,k}, \Delta_{i,j,k+1}, \Delta_{i,j,k-1}\}.$$

Состояние единичного объема в плане пожарной опасности определяется:

- координатами в трехмерном пространстве помещения;
- собственными характеристиками;
- зависимостью от характеристик соседних единичных объемов;
- временной характеристикой («шагом времени»).

Результаты моделирования развития пожароопасных ситуаций в помещении необходимы не только для прогнозирования возможных координат ИЗ и ГМВ, но и для определения мест размещения источников информации системы контроля пожарной опасности (СКПО) на этапе проектирования транспортного средства и для формирования алгоритмов распознавания пожароопасной ситуации при разработке СКПО [8, 9].

Система имитационного моделирования развития пожароопасных ситуаций состоит из комплекса основных

математических моделей, структура которого представлена на рис. 5.

### Источники информации для распознавания возникновения пожароопасной ситуации

С математической точки зрения разработка моделей для расчета количества первичных источников информации и мест их размещения не представляет принципиальной трудности. Эти модели хорошо укладываются в развитую концепцию линейного целочисленного программирования. Однако для систем ранней диагностики пожарной опасности формальный расчет по таким моделям в большинстве случаев может оказаться практически бесполезным. Дело в том, что при выборе источников информации для подобных систем необходимо учитывать детальное насыщение помещений транспортного средства, физико-химические характеристики материалов и сред, устройства технических средств, режимы работы оборудования.

Задача выбора источников информации и определение значений критических параметров непосредственно связана с задачей формирования алгоритмов распознавания возникновения пожароопасной ситуации.

Предположим, что экспертным путем (с использованием программно-аппаратного комплекса для моделирования пожароопасной ситуации или без него — для небольших по объему помещений или помещений с малым количеством тепловыделяющего оборудования) определены номенклатура и места раз-

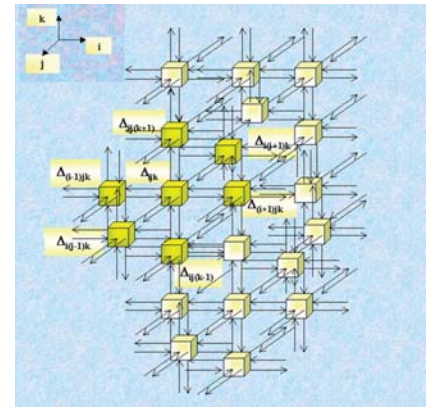


Рис. 4. Фрагмент модели в виде пространственной структуры клеточных автоматов

мещения первичных источников информации — сенсоров, а также критические величины измеряемых параметров.

В связи с наличием множества разнообразных ИЗ и ГМВ в помещениях транспортных средств появляется необходимость в установке большого количества сенсоров, контролирующих тепловое поле и изменение обстановки, что в большинстве случаев невозможно реализовать в полном объеме по множеству причин (стоимость, массо-габаритные параметры, надежность и т. п.). Сокращение количества источников информации влечет за собой сокращение информации, характеризующей пожарную опасность. Задача оптимизации количества сенсоров напрямую связана с задачей распознавания пожарной опасности: чем меньше сенсоров мы оставим от первоначального числа, тем сильнее возрастет неопределенность в задаче распознавания.

Облегчает решение обозначенной

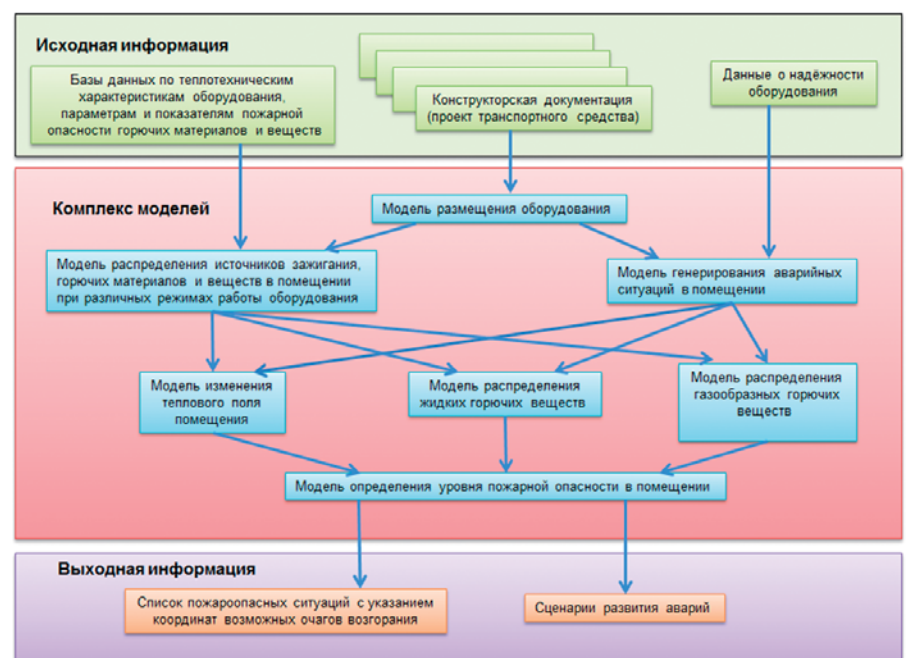


Рис. 5. Структура системы имитационного моделирования развития пожароопасных ситуаций



Рис. 6. Источники информации о пожарной опасности

проблемы то, что для получения информации о состоянии ИЗ и ГМВ и занимаемом ими в пространстве помещения положении имеется возможность использовать также информацию, формируемую в других системах транспортного средства, получаемую от членов экипажа и пассажиров (рис. 6).

Система контроля пожарной опасности не заменяет системы пожарной сигнализации, точно так же как система пожарной сигнализации не способна предупредить пожар. Они должны существовать одновременно. В ряде случаев их целесообразно интегрировать в единую систему.

\*\*\*

Казалось бы, естественно ожидать появления систем, предупреждающих возникновение пожаров, от организаций, которые профессионально занимаются разработкой систем противопожарной автоматики и, в первую очередь, системами пожарной сигнализации. Но сле-

дует учесть, что основное назначение системы пожарной сигнализации не совпадает с основным назначением системы контроля пожарной опасности транспортного средства. В первом случае это сигнализация об уже возникшем пожаре (пусть даже на очень ранней стадии), во втором — предупреждение его возникновения. Соответственно, и технологии, необходимые для создания этих систем, существенно различаются. Освоение новых технологий связано с необходимостью изыскания дополнительных материальных ресурсов, изменения организационной структуры предприятия и привлечения новых специалистов. Поэтому при отсутствии реального заказчика было бы наивно ожидать в обозримой перспективе проявления какой-либо инициативы по созданию систем контроля пожарной опасности со стороны традиционных разработчиков и поставщиков систем пожарной сигнализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Е. Н. Расчет и проектирование систем противопожарной защиты. М.: Химия, 1990.
2. Борьба с пожарами на судах. Т. 1. Пожарная опасность на судах / Под ред. М. Г. Ставицкого. — Л.: Судостроение, 1976.
3. Круглеевский В. Н. Пути решения проблемы автоматизации контроля пожарной опасности в судовых помещениях // Судостроение. — 2005. — № 2 (759).
4. Патент № 2179470 РФ. Способ обнаружения пожарной опасности и пожара в помещении судна. Круглеевский В. Н. — М.: Роспатент. — Бюлл. № 5. — 2002.
5. Нейман Дж., фон. Теория самовоспроизводящихся автоматов. — М.: Мир, 1971.
6. Варшавский В. И. Коллективное поведение автоматов. — М.: Наука, 1973.
7. Тоффоли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов. — М.: Мир, 1991.
8. Солонько В. А., Круглеевский В. Н., Колесник В. А. Контроль пожарной опасности в корабельных помещениях как задача распознавания образов // Морской вестник. — 2006. — № 3 (19).
9. Солонько В. А. Круглеевский В. Н., Колесник В. А. Методика оценки пожарной опасности в корабельных помещениях // Морской вестник. — 2006. — № 4 (20).

**Pentair**  
Technical Products

**Schroff®**

предумано и экономично  
IP-защита и ВЧ-экранирование

прочность и гибкость  
выдерживает экстремальные нагрузки

эффективность и безопасность  
впечатляющая сейсмостойкость

устойчивость и грузоподъемность  
сертифицированная ударо- и вибростойкость

**VARISTAR**  
Универсальная шкафная платформа для экстремальных приложений

pentairtechnicalproducts.com

www.schroff.ru