

---

---

# ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НА ТРАНСПОРТЕ И ОБЪЕКТАХ ИНФРАСТРУКТУРЫ

---

---

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**А.А. Кузьмин, кандидат педагогических наук, доцент;**

**Н.Н. Романов, кандидат технических наук, доцент.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Определены требования к модели, позволяющей обеспечить численную оценку пожароопасных ситуаций на промышленных объектах при разгерметизации технологического оборудования. Рассмотрены ограничения, позволяющие упростить решения связанной системы дифференциальных уравнений для начальной стадии пожара. Получены расчетные уравнения для определения расхода продуктов горения и их среднеобъемной температуры. Представлено дерево событий. Предложен циклический алгоритм расчета температурного режима пожара на основе полученных расчетных уравнений.

*Ключевые слова:* пожароопасная ситуация, паровоздушная смесь, опасные факторы пожара, расход продуктов горения, температура продуктов горения, пожарная нагрузка, дерево событий

Одной из основных составляющих системы безопасности технологических процессов на промышленных объектах является обеспечение безопасности обслуживающего персонала и посторонних людей, находящихся в селитебной зоне вблизи объекта, а также минимизация последствий возможных аварий, связанных с разгерметизацией технологического оборудования, утечки горючих и легковоспламеняющихся жидкостей (ГЖ и ЛВЖ) и их последующего загорания. Выбор содержания необходимых мероприятий и их последующее технико-экономическое обоснование предполагает анализ нескольких вариантов проектно-технических решений и базируется на нахождении расчетных величин пожарных рисков, что требует обращения к базам данных физических параметров различных веществ и материалов, массивам нормативных документов и проведения на их основе значительного объема расчетных операций.

Использование современных информационно-коммуникационных технологий позволяет существенно уменьшить трудоемкость проводимых вычислительных операций, но для этого необходимо создание адекватной модели и ее формализации в виде соответствующего алгоритма, который бы включал:

– исчерпывающий перечень пожароопасных ситуаций и соответствующих сценариев их развития, при этом в качестве опасных факторов пожара (ОФП) необходимо учитывать, прежде всего, интенсивность теплового излучения продуктов горения, значения избыточного давления и параметры импульса волны давления при сгорании образующейся паровоздушной смеси (ПВС), концентрации токсичных компонентов продуктов горения в производственном помещении;

– отображение развития пожароопасных ситуаций в виде дерева событий, содержащего графы их связей;

– порядок расчета частоты реализации пожароопасных ситуаций;

– процедуру построения полей ОФП для различных сценариев развития пожара.

Численная оценка ОФП базируется на использовании интегрального подхода при решении связанной системы дифференциальных уравнений баланса [1], первым из которых является уравнение материального баланса газовой среды:

$$\frac{d(\rho_m V)}{d\tau} = \psi + G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}$$

где  $V$  – объем продуктов горения, заполняющего производственное помещение,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_m$  – средняя плотность газовой среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\psi$  – скорость выгорания пожарной нагрузки;  $G_{\text{вх}}$ ,  $G_{\text{вых}}$  – массовые расходы входящего воздуха и выходящих из помещения продуктов горения в текущий момент времени соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Используя первый закон термодинамики, выводится уравнение баланса энергии на пожаре:

$$\frac{1}{k-1} \cdot \frac{d(\rho_m V)}{d\tau} = \eta Q_n^p + i_\varepsilon \psi + c_{p\text{вх}} T_{\text{вх}} G_{\text{вх}} - c_p k_{\text{вых}} T_m G_{\text{вых}} - Q_{\text{ок}}$$

где  $k$  – постоянная адиабаты;  $\eta$  – коэффициент неполноты сгорания пожарной нагрузки;  $Q_n^p$  – удельная теплота горения,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $i_\varepsilon$  – удельная энтальпия продуктов газификации пожарной нагрузки,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $T_{\text{вх}}$  и  $T_m$  – температуры воздуха на входе и средняя температура газовой среды соответственно,  $\text{К}$ ;  $k_{\text{вых}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий разницу постоянных адиабаты поступающего воздуха и продуктов горения;  $Q_{\text{ок}}$  – удельные тепловые потери пожара через ограждения,  $\text{кВт}$ .

Связанная система дифференциальных уравнений включает в себя также уравнения баланса оптического качества дыма, токсического продукта горения и массы кислорода и замыкается уравнением состояния газовой среды, то есть уравнением Менделеева-Клапейрона в той или другой форме.

Анализ имевших место инцидентов с пожарами и взрывами на промышленных объектах [2] позволяет выделить закономерности возникновения и развития пожароопасных ситуаций, согласно которым аварии на таких объектах развиваются по следующему типовому сценарию:

- разгерметизация арматуры или оборудования вызывает процесс истечения ГЖ или ЛВЖ в окружающую среду;
- вышедший продукт либо воспламеняется, либо создает обширную зону ПВС, имеющую взрывоопасную концентрацию горючего компонента;
- ОФП воздействуют на другое оборудование, при этом абсолютное давление продукта может превысить допустимое с потерей прочности и разрушением с последующей разгерметизацией из-за разрушения уплотняющих узлов арматуры.

Для начальной стадии пожара в работе [3] приводится существенное упрощение связанной системы дифференциальных уравнений, принимая:

$$\rho_m \cdot T_m = \rho_o \cdot T_o,$$

где  $\rho_m$ ,  $T_m$  – усредненная плотность и абсолютная температура продуктов горения;  $\rho_o$ ,  $T_o$  – плотность и абсолютная температура воздуха до начала пожара.

Тогда система уравнений, описывающих пожар, принимает вид:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi - G_{\text{вых}}$$

$$\eta \cdot Q_H^p \psi + i_{\text{э}} \psi - c_p T_m G_{\text{вых}} - Q_K = 0 \quad (1)$$

Необходимо также учесть, что возможные изменения концентрации кислорода и средней температуры в производственном помещении на начальной стадии пожара на промышленных объектах могут быть незначительными, что позволяет пренебречь изменениями значений коэффициента полноты сгорания  $\eta$  и дымообразующей способности пожарной нагрузки  $D$ .

Алгебраическое уравнение энергии пожара после несложных преобразований позволяет получить расчетную формулу расхода продуктов горения (2):

$$G_{\text{вых}} = \frac{\eta \cdot Q_H^p (1 - \varphi) + i_{\text{э}}}{c_p T_o \rho_o} \psi \cdot \rho_m \quad (2)$$

где  $\varphi$  – отношение тепловых потерь через ограждения к величине тепловыделения на пожаре, учитывая специфику производственных помещений на промышленных объектах можно считать постоянной.

Считая систему (1) несвязанной после разделения переменных и последующего интегрирования уравнения материального баланса, получаем закон изменения средней температуры продуктов горения (3):

$$T_m = \frac{\left( \frac{G_{\text{вых}}}{\psi \cdot \rho_m} \right) \cdot \rho_o T_o}{1 - \left( 1 - \frac{G_{\text{вых}}}{\psi \cdot \rho_m} \right) \exp \left( - \frac{A \cdot G_{\text{вых}}}{V \cdot \psi \cdot \rho_m} \tau^n \right)} \quad (3)$$

Величины постоянных  $A$  и  $n$  определяются формой разлива горячей ГЖ или ЛВЖ:

– для кругового распространения пламени  $A = 0,33 \cdot \pi \cdot \psi \cdot V_n^2$ ,  $n = 3$ ;

– для прямоугольного распространения пламени  $A = b \cdot \psi \cdot V_n$ ,  $n = 2$ .

$V_n$  – линейная скорость распространения пламени, м/с.

Из уравнения (3) после несложных преобразований можно получить выражение (4) для времени  $\tau_{кр, T}$  достижения предельно допустимого значения температуры продуктов горения  $T_{кр}$  в производственном помещении:

$$\tau_{кр, T} = \sqrt[n]{\frac{V \cdot \psi \cdot \rho_m}{A \cdot G_{вых}} \ln \left[ \frac{T_{кр} \left( 1 - \frac{G_{вых} \cdot \rho_o}{\psi \cdot \rho_m} \right)}{T_{кр} - \frac{G_{вых} \rho_o T_o}{\psi \cdot \rho_m}} \right]} \quad (4)$$

Аналогичным образом можно получить выражение (5) для времени  $\tau_{кр, m_2}$  достижения предельного значения концентрации токсичных газов  $r_{m_2}$  в продуктах горения:

$$\tau_{кр, m_2} = \sqrt[n]{\frac{V \cdot \psi \cdot \rho_m}{A \cdot G_{вых}} \ln \left[ \frac{r_{m_2}}{r_{m_2} - \frac{G_{вых} \rho_{m_2}}{\psi \cdot \rho_m}} \right]} \quad (5)$$

При пожаре определяющее значение могут иметь один или несколько ОФП, однако воздействие всех ОФП на персонал и личный состав службы пожаротушения происходит одновременно. В работе [4] приводятся сведения о предельно допустимых значениях ОФП. Так предельно допустимое значение плотности теплового потока  $q_{кр} = 1400 \text{ Вт/м}^2$ . Допустимое значение температуры на поверхности кожи человека принимается равным  $t_{дон} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Необходимая плотность кислорода в воздухе принимается равной  $\rho_k = 0,226 \text{ кг/м}^3$ . Если содержание кислорода в воздухе в результате пожара уменьшилась вдвое, нарушится работа дыхательной и сердечно-сосудистой системы организма человека. Если содержание кислорода уменьшилось втрое, то наступает летальный исход. Установлены и предельно допустимые величины для токсичных компонентов в продуктах горения: допустимая плотность диоксида углерода составляет  $\rho_{до} = 0,11 \text{ кг/м}^3$ ; окиси углерода  $\rho_{оу} = 0,00116 \text{ кг/м}^3$ ; хлороводорода  $\rho_{нв} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$ .

Время блокировки пути эвакуации персонала промышленного объекта ОФП рассчитывается на основе времени достижения каждым ОФП своей предельно допустимой величины на пути эвакуации персонала. Если в результате утечки ГЖ или ЛВЖ взрыва не происходит, то большую часть персонала возможно эвакуировать на начальной стадии пожара, что отражается на оценке пожароопасной ситуации, так как в этот временной промежуток значительных изменений большинства ОФП не происходит. Исключением является резкий рост уровня задымления [5].

Основные характеристики возможного пожара на технологическом оборудовании, полученные с применением расчетных выражений (2)-(5), позволяют выявить наиболее вероятные сценарии и пожароопасные ситуации в их связи.

Для формирования полного перечня пожароопасных ситуаций, которые могут возникнуть при разгерметизации технологического оборудования, существующие методики, например в работе [4], предполагают выявление перечня возможных источников зажигания. При этом учитываются особенности данной пожароопасной технологической среды, что можно определить при сравнении показателей штатного техпроцесса и других обстоятельств, которые предполагают наличие источников зажигания с показателями обрабатываемых веществ и материалов в части их пожарной опасности.

Дерево событий, содержащее сценарии развития пожароопасных ситуаций и их связи, отображено на рис. 1.

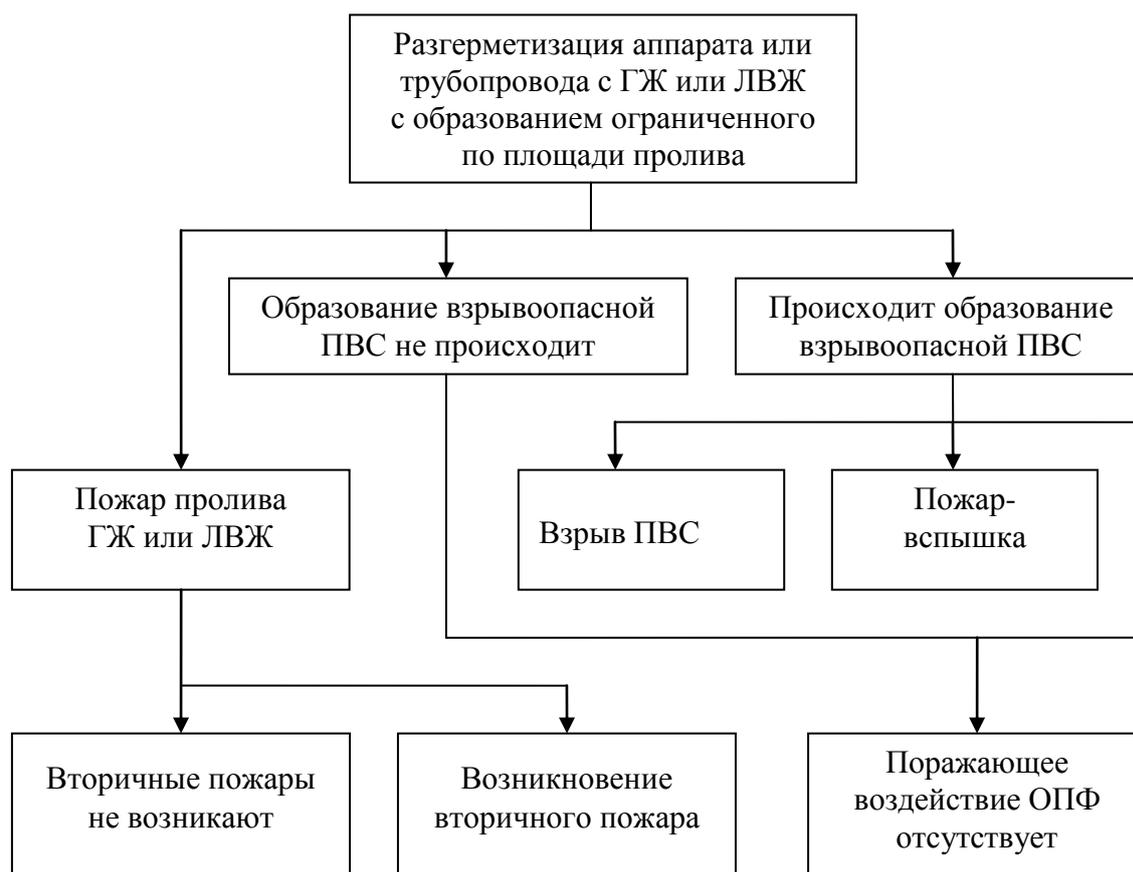


Рис. 1. Дерево событий, содержащее сценарии развития пожароопасных ситуаций при разгерметизации технологического оборудования

Основным способом упрощения структуры дерева событий может быть интеграция пожароопасных ситуаций с одинаковыми моделями развития пожара в группы типовых и отказ от анализа ситуаций с небольшим риском. Последнее должно быть точно определено и обосновано, так как существует вероятность возникновения ситуаций, каждая из которых несет относительно небольшой риск, однако суммарный риск может быть весьма значительным. Кроме того, для оценки вероятности появления пожароопасной ситуации необходимо применять статистические данные по частоте аварий на аналогичном технологическом оборудовании.

Моделирование выявленных наиболее вероятных сценариев развития пожароопасных ситуаций возможно на основе циклического алгоритма расчета температурного режима пожара, изображенного на рис. 2.

Циклический алгоритм расчета температурного режима пожара был реализован в форме макроса Visual Basic [6], дополненного интерфейсом Visual Basic [7].

На основе результатов расчета температурного режима пожара появляется возможность в полной мере моделировать развитие пожароопасных ситуаций на промышленных объектах при разгерметизации технологического оборудования.

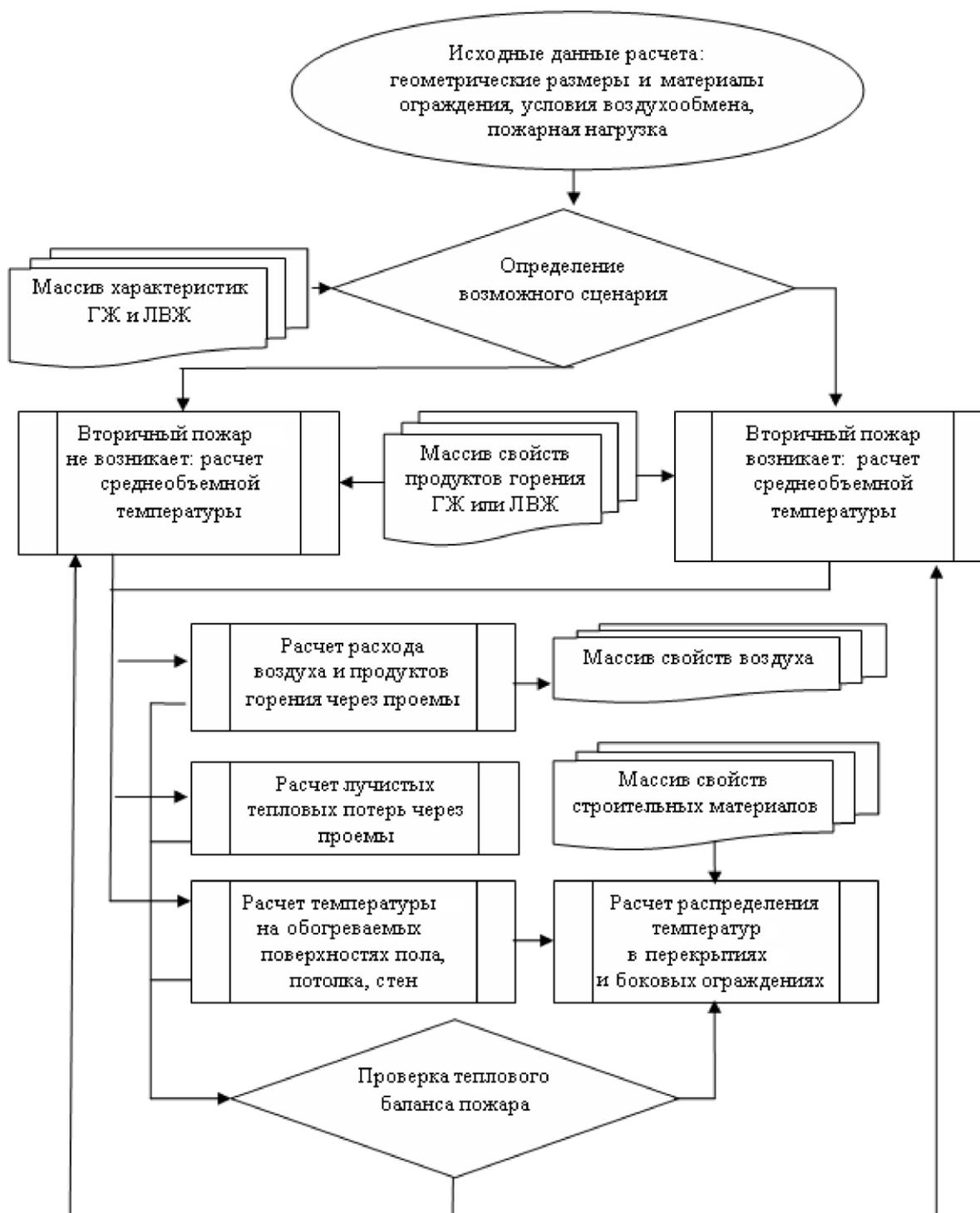


Рис. 2. Циклический алгоритм расчета температурного режима пожара

### Литература

1. Кошмаров Ю.А., Рубцов В.В. Процессы нарастаний ОФП в производственных помещениях и расчет критической продолжительности пожара. М.: МИПБ МВД России, 1998. 90 с.
2. Информация об авариях, произошедших на предприятиях, подконтрольных территориальным органам Федеральной службы по экологическому, технологическому, атомному надзору. URL: <http://www.rostehnadzor.ru/chronicle.html> (дата обращения: 26.04.2018).

3. Колодяжный С.А., Переславцева И.И. Математическое моделирование динамики основных опасных факторов в начальной стадии пожара // Известия КГАСУ. 2014. № 4 (30). С. 403–412.

4. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: Приказ МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

5. Мелькумов В.Н., Кузнецов С.Н., Гулак В.В. Моделирование задымленности помещений сложной конфигурации в начальной стадии пожара // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2010. № 3. С. 131–138.

6. Visual Basic | Microsoft Docs. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/visual-basic/> (дата обращения: 26.04.2018).

7. Excel – программа редактирования таблиц XLS | Microsoft. URL: <https://products.office.com/ru-ru/excel> (дата обращения: 26.04.2018).

