

10. Клименко Ю.А., Львович Я.Е., Преображенский А.П. Проектирование контрольно-измерительных компонент распределительных энергетических систем // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2024. – Т. 24. № 1. – С. 88-97.

Хабибулин Р.Ш.

Имитационная модель оперативных фаз реагирования на пожары объектов топливно-энергетического комплекса с робастной оптимизацией времени, риска и ресурсов

Аннотация: В работе представлена имитационная модель управления оперативными фазами реагирования пожарно-спасательных подразделений на пожары объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Модель основана на статистическом анализе эмпирических данных 195 пожаров на нефтебазах и нефтехранилищах, зарегистрированных в период с 2009 по 2021 год. Разработан методологический подход робастной многокритериальной оптимизации, учитывающий три ключевых критерия управления: время выполнения оперативных фаз, уровень риска неблагоприятных условий и объем затрачиваемых ресурсов.

Ключевые слова: оперативные фазы реагирования, пожарная безопасность, топливно-энергетический комплекс, имитационное моделирование, робастная оптимизация, метод Монте-Карло

Введение

Оперативное реагирование пожарно-спасательных подразделений на пожары объектов топливно-энергетического комплекса (далее – ТЭК) представляет собой сложный стохастический процесс, характеризующийся высокой степенью неопределенности [1, 2]. Объекты ТЭК, включающие нефтебазы, нефтехранилища и резервуарные парки, относятся к категории опасных производственных объектов первого класса опасности, где последствия пожаров могут иметь катастрофический характер.

Анализ статистических данных по пожарам на объектах ТЭК демонстрирует значительную вариативность времени выполнения оперативных фаз реагирования. Традиционные детерминированные модели планирования операций по тушению пожаров, основанные на усредненных нормативных показателях, не учитывают стохастическую природу процесса и возможность развития экстремальных сценариев, что существенно снижает их практическую применимость. При этом современные требования к обеспечению пожарной безопасности объектов ТЭК диктуют необходимость разработки новых подходов к моделированию и оптимизации процессов оперативного реагирования, способных учитывать многофакторную неопределенность и обеспечивать робастность управлений решений в широком диапазоне условий. Разработка и внедрение математических моделей, вычислительных алгоритмов и специализированных программно-аппаратных комплексов (цифровых двойников) [3-5], ориентированных на системный анализ и параметрическую оптимизацию процессов экстренного реагирования на пожары, представляет собой актуальную научно-исследовательскую задачу.

Целью настоящего исследования является разработка и валидация имитационной модели оперативных фаз реагирования на пожары объектов ТЭК с применением методов робастной многокритериальной оптимизации по параметрам времени, риска и используемых ресурсов.

Постановка задачи

Процесс оперативного реагирования на пожары объектов ТЭК структурирован в виде последовательности взаимосвязанных фаз (от 1 до 6). В рамках данного исследования рассматриваются три последние (4–6) как наиболее значимые для управления оперативные фазы реагирования, непосредственно направленные на локализацию и ликвидацию пожара (таблица 1).

Представленная в таблице 1 структура оперативных фаз отражает технологическую последовательность действий подразделений при тушении пожаров на объектах ТЭК. Каждая фаза характеризуется специфическим набором операций и критических параметров, определяющих эффективность реагирования. Фаза локализации является критически важной для предотвращения

каскадного развития аварии, фаза ликвидации требует максимальной концентрации ресурсов, а завершающая фаза может занимать наибольшее время в общем времени реагирования.

Таким образом, анализ продолжительности и эффективности отдельных фаз позволяет выявить узкие места в структуре реагирования, определить приоритетные направления оптимизации распределения ресурсов, а также построить фазо-ориентированные стохастические модели, обеспечивающие статистическое прогнозирование и калибровку цифровых двойников процессов тушения пожаров на объектах ТЭК.

Таблица 1 – Характеристика оперативных фаз реагирования на пожары объектов ТЭК

Обозначение фазы	Наименование	Содержание операций	Критические параметры
Фаза 4	Локализация пожара	Ограничение распространения горения, предотвращение перехода огня на соседние резервуары	Скорость развертывания сил, интенсивность подачи огнетушащих веществ
Фаза 5	Ликвидация открытого горения	Подавление основных очагов горения в резервуаре, прекращение горения разлитого продукта	Выбор способа тушения, концентрация сил и средств пожарно-спасательных подразделений
Фаза 6	Ликвидация последствий пожара	Завершение работ на пожаре, предотвращение повторного возгорания	Длительность охлаждения, контроль температурного режима

Задача управления оперативными фазами реагирования формализуется как задача многокритериальной оптимизации в условиях неопределенности. Определим три целевые функции, подлежащие минимизации:

Критерий 1. Минимизация общего времени выполнения оперативных фаз

$$f_1 = T_{tot} = T_4 + T_5 + T_6 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где T_4, T_5, T_6 – случайные величины, представляющие длительности соответствующих фаз реагирования в минутах.

Критерий 2. Минимизация интегрального риска неблагоприятных условий

$$f_2 = Risk = \sum_{c \in C} \mathbb{1}(c) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где C – множество неблагоприятных факторов (отсутствие водоисточников, разливы легковоспламеняющихся (горючих) жидкостей за пределы обвалования, неблагоприятные метеорологические условия),

$\mathbb{1}(c)$ – индикаторная функция наличия условия c .

Критерий 3. Минимизация затрат ресурсов

$$f_3 = ResCost = \sum_{r \in R} w_r \cdot x_r \rightarrow \min, \quad (3)$$

где R – множество доступных ресурсов (огнетушащие вещества, пожарная техника и др.),

w_r – условные веса (стоимостные эквиваленты) ресурсов, x_r – количество ресурса типа r .

Интегральная задача управления (обобщенная целевая функция) формулируется следующим образом:

$$\min_{\pi \in \Pi} J(\pi) = \alpha \cdot f_1(\pi) + \beta \cdot f_2(\pi) + \gamma \cdot f_3(\pi), \quad (4)$$

при ограничениях

$$\alpha + \beta + \gamma = 1, \alpha, \beta, \gamma \geq 0, \quad (5)$$

где π – стратегия распределения ресурсов из допустимого множества P ,

α, β, γ – управлеченческие приоритеты, определяемые лицом принимающим решения (далее – ЛПР).

Для обеспечения устойчивости решений в условиях стохастической неопределенности применяется концепция робастной оптимизации. В качестве ключевой метрики робастности используется *CVaR* (*Conditional Value-at-Risk*) – условное математическое ожидание при превышении заданного квантиля:

$$\begin{aligned} CVaR_\alpha(T_{tot}) &= E[T_{tot}|T_{tot} \geq q_\alpha] = \\ &= (1/(1 - \alpha)) \cdot \int_{q_\alpha}^{\infty} t \cdot p(t) dt, \end{aligned} \quad (6)$$

где q_α – α -квантиль распределения общего времени выполнения фаз реагирования,

$p(t)$ – плотность распределения вероятностей. Метрика *CVaR* позволяет явно учитывать затяжные по времени сценарии развития пожара при формировании стратегий управления.

Методология исследования и имитационного моделирования

Основой для построения имитационной модели служит база данных, содержащая детализированную информацию о 195 пожарах на нефтебазах и нефтехранилищах, зарегистрированных в период с 2009 по 2021 год. Для каждой записи в базе данных зафиксированы:

- временные характеристики выполнения фаз 4, 5 и 6 с точностью до минуты;
- кодированные обозначения неблагоприятных условий;
- перечень и объем использованных ресурсов;
- итоговые показатели эффективности реагирования.

Такой объем статистической информации обеспечивает репрезентативность выборки и позволяет выявить закономерности процесса с учетом достаточно редких, но критически важных событий.

Архитектура имитационной модели демонстрирует многоуровневую структуру обработки данных. Модель начинается с

загрузки эмпирических данных о 195 пожарах, включает этап предобработки с вычислением интегральных показателей *Risk* и *ResCost*. Ядром модели является блок симуляции по методу Монте-Карло, где применяется бутстреп-подход для генерации случайных длительностей фаз на основе эмпирических функций распределения. Завершается процесс робастной оптимизацией с построением Парето-фронта и применением метода *TOPSIS* для ранжирования управлеченческих стратегий.

Результаты моделирования и анализ

Статистический анализ эмпирических данных и результатов имитационного моделирования позволил установить временные характеристики оперативных фаз реагирования, которые демонстрируют существенную асимметрию в структуре общего времени выполнения оперативных фаз. Фазы локализации и ликвидации характеризуются равными медианными значениями (около 7 минут), в то время как фаза ликвидации последствий пожара занимает примерно вдвое больше времени (14–15 минут), что составляет около 40% от общего медианного времени всего времени реагирования.

Критически важным является существенный разрыв между медианой общего времени (38 минут) и значением $CVaR_{\alpha=0.9}$ (391 минута), который указывает на наличие тяжелых (затяжных) сценариев с общим временем реагирования, превышающим 6 часов (охватывает 10% наиболее продолжительных пожаров).

Определена структура основных факторов, влияющих на длительность выполнения оперативных фаз реагирования, выявленных на основе анализа эмпирических данных. Неблагоприятные условия (отсутствие воды, разливы горючих жидкостей) приводят к увеличению времени выполнения всех фаз через мультиплекативные коэффициенты $\delta > 0$. Применение дополнительных ресурсов (пожарная техника) сокращает время реагирования, но увеличивает общие затраты, что требует оптимизации соотношения «время-стоимость».

Литература:

1. *Хабибулин Р.Ш.* Прогнозирование временных интервалов реагирования пожарно-спасательных подразделений на пожары объектов топливно-энергетического комплекса на основе гамма-распределений и марковской цепи / Моделирование сложных процессов и систем: Сборник трудов XXXV Международной научно-практической конференции, Химки (26 февраля 2025 года). – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика, 2025. – С. 82-86.
 2. *Витисов В.Я., Хабибулин Р.Ш.* Анализ эффекта локализации марковских моделей процесса ликвидации пожара для различных типов объектов топливно-энергетического комплекса // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2024. – № 33–1. – С. 12-15.
 3. *Li Y., Zhang T., Ding Y., Wadhwani R., Huang X.* Review and perspectives of digital twin systems for wildland fire management // Journal of Forestry Research. – 2025. – Vol. 36, N no. 1: 14. – DOI: 10.1007/s11676-024-01810-x.
-