

**ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЖАРОВ В
РЕЗЕРВУАРАХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

Д.М. Рахматова

***Аннотация.** Рассматривается проблема предупреждения и предотвращения пожаров в резервуарах для хранения нефтепродуктов при чрезвычайных ситуациях техногенного характера. Цель исследования — научное обоснование последовательности организационно-технических мероприятий по раннему выявлению опасного состояния, локализации аварийного процесса и предотвращению развития пожара. Используются методы системного анализа, структурно-функционального моделирования и причинно-следственного анализа. Установлена последовательность формирования опасного состояния: нарушение герметичности — выход нефтепродукта — образование паровоздушной среды — воспламенение — тепловое воздействие на соседние резервуары. Разработана структурная модель предупреждения и предотвращения пожара, включающая мониторинг, выявление опасных отклонений, оценку обстановки, локализацию и противопожарное воздействие. Сформулированы рекомендации по совершенствованию противопожарной защиты резервуарных парков.*

***Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, резервуарный парк, нефтепродукты, пожарная опасность, пожар, взрыв, предупреждение пожара, предотвращение пожара, противопожарная защита.*

***Abstract.** The paper considers the problem of preventing and mitigating fires in petroleum product storage tanks during man-made emergencies. The aim of the study is to provide a scientific basis for a sequence of organizational and technical measures for early detection of hazardous conditions, localization of an emergency process, and prevention of fire development. System analysis, structural-functional modeling, and cause-and-effect analysis were used. The sequence of hazardous condition development was established as follows: loss of tightness — petroleum product release — formation of a vapor-air mixture — ignition — thermal exposure of adjacent tanks. A structural model for fire prevention and mitigation was developed, including monitoring, detection of hazardous deviations, situation assessment, localization, and*

firefighting measures. Recommendations for improving fire protection of tank farms are proposed.

Keywords: *emergency situation, tank farm, petroleum products, fire hazard, fire, explosion, fire prevention, fire mitigation, fire protection.*

Введение. Резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов относятся к объектам, на которых сочетание значительных объёмов горючих веществ, технологического оборудования и потенциальных источников зажигания формирует условия для возникновения и развития пожароопасных процессов.

Особенность чрезвычайных ситуаций на резервуарных объектах заключается в возможности перехода первоначального повреждения в более масштабный процесс [2]. Нарушение герметичности может сопровождаться выходом нефтепродукта, образованием горючих паров (в том числе при рисках самовозгорания пирофорных отложений [5]), их распространением в окружающем пространстве и последующим воспламенением. При возникновении пожара дополнительно появляется угроза теплового воздействия на соседние резервуары, а также вскипания и выброса продукта [6], что создаёт предпосылки для дальнейшего распространения аварии.

Современные исследования показывают необходимость учёта прогрессирующего и каскадного характера развития пожароопасной ситуации на объектах хранения нефтепродуктов. В частности, Бруслиновским А.Ю. в 2023 г. исследовано моделирование прогрессирующего развития пожароопасной ситуации при хранении нефтепродуктов в стальных резервуарах [1]. Самигуллин Г.Х. и Захаров А.Е. в 2024 г. рассматривали возможность эскалации пожара и вопросы предупреждения прогрессирующего развития негативных событий. Для тушения и парирования угроз также рассматриваются газовые [4] и автоматизированные противопожарные системы [3].

Вместе с тем для повышения эффективности защиты требуется рассматривать предупреждение пожара не как отдельную техническую операцию, а как управляемую последовательность действий, начинающуюся с выявления опасного состояния и завершающуюся оценкой результата защитного воздействия.

Цель исследования — научное обоснование организационно-технической последовательности предупреждения и предотвращения пожаров в резервуарах для хранения нефтепродуктов при чрезвычайных ситуациях.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. систематизация основных факторов, способствующих формированию пожарной опасности;

2. установление причинно-следственной последовательности развития опасного процесса;
3. определение контролируемых признаков аварийного состояния резервуара;
4. разработка структурной модели предупреждения пожара;
5. определение приоритетных направлений локализации и предотвращения развития пожара;
6. разработка практических рекомендаций по совершенствованию противопожарной защиты резервуарных парков.

Материалы и методы исследования

В качестве методологической основы исследования использованы методы системного анализа техногенного риска, теории надежности технических систем, структурно-функционального моделирования процессов противопожарной защиты, а также причинно-следственного анализа аварийных ситуаций.

Для формализации процесса предупреждения и оценки динамики эскалации чрезвычайной ситуации введена система динамических показателей:

1. **Интегральный пожарный риск $R(t)$** — определяющий совокупную вероятность возникновения горения и масштаба возможного ущерба смежному технологическому оборудованию в момент времени t .
2. **Уровень технико-организационной контролируемости аварии $K(t)$** — интегральный показатель, характеризующий полноту, точность и оперативность срабатывания систем раннего обнаружения, локализации и противопожарной защиты ($0 \leq K(t) \leq 1$).

Математическая модель изменения пожарного риска основывается на экспоненциальном затухании опасности при условии эффективного выполнения управляющих действий структурной модели:

$$R(t) = R_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

где R_0 — начальный уровень пожарного риска в момент разгерметизации/аварии; α — коэффициент интенсивности парирования угрозы элементами противопожарной системы.

Рост контролируемости процесса $K(t)$ описывается сигмоидальной (логистической) функцией, отражающей временной лаг между обнаружением первичного отклонения и выходом противопожарных средств на максимальную мощность:

$$K(t) = \frac{1}{1 + e^{-k(t-t_0)}}$$

где k — параметр крутизны срабатывания системы; t_0 — время достижения половинной мощности управляющего воздействия.

На рисунке 1 представлена динамика изменения интегрального пожарного риска $R(t)$ и эффективности системы контроля $K(t)$ при реализации предлагаемой структурной модели.

Risk $R(t)$, Control $K(t)$.

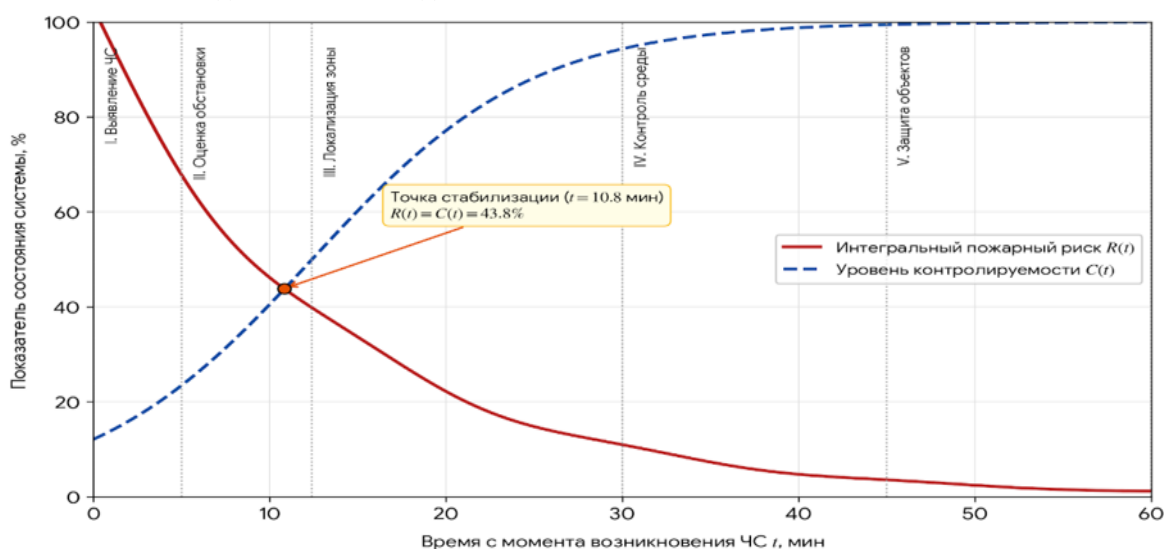


График -1. Динамика изменения интегрального пожарного риска $R(t)$ и эффективности системы контроля $C(t)$ при реализации структурной модели

Анализ динамических характеристик (рис. 1) показывает, что в процессе выполнения этапов структурной модели функция интегрального пожарного риска $R(t)$ экспоненциально снижается, в то время как уровень технико-организационной контролируемости аварии $K(t)$ демонстрирует сигмоидальный рост.

Ключевым показателем эффективности разработанных решений является точка стабилизации ($t_{\text{стаб}}$, $R_{\text{стаб}}$), обозначающая момент времени, при котором управляющее воздействие противопожарных систем превышает динамику развития аварийной ситуации, что предотвращает эскалацию горения на смежное резервуарное оборудование [1, 6].

Обсуждение результатов. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что предупреждение пожара на резервуарных объектах должно строиться на принципе опережающего воздействия на опасный процесс.

При этом недостаточно контролировать только конечное состояние — наличие пламени. Более эффективным является выявление ранних признаков формирования опасности: нарушения герметичности, изменения

технологических параметров, выхода продукта и формирования пожароопасной среды [2, 5].

Такой подход соответствует общей логике систем пожарной безопасности, согласно которой необходимо одновременно обеспечивать предотвращение возникновения пожара и ограничение воздействия его опасных факторов.

Особое значение приобретает защита соседних резервуаров. При развитии пожара необходимо учитывать возможность теплового воздействия на окружающее оборудование. Поэтому противопожарная система резервуарного парка должна функционировать не только относительно отдельного резервуара, но и с учётом взаимного влияния объектов [1].

Современные исследования также показывают перспективность применения автоматизированных и роботизированных средств противопожарной защиты на складах нефти и нефтепродуктов [3, 4]. В частности, в 2026 г. опубликовано исследование применения роботизированных установок пожаротушения для защиты резервуарных парков [3].

Заключение. Проведённое исследование позволило сформировать научно обоснованную последовательность предупреждения и предотвращения пожаров в резервуарах для хранения нефтепродуктов при чрезвычайных ситуациях.

Установлено, что развитие пожарной опасности представляет собой последовательный процесс, включающий нарушение герметичности, выход нефтепродукта, образование пожароопасной среды, возникновение источника зажигания и последующее тепловое воздействие на технологическое оборудование.

Научная значимость предлагаемого подхода заключается в систематизации взаимосвязи между ранними признаками аварийного состояния и последующими противопожарными мероприятиями. Практическая значимость состоит в возможности использования разработанной последовательности при совершенствовании организационно-технических мероприятий по пожарной безопасности резервуарных парков.

Дальнейшее развитие исследования целесообразно направить на разработку количественных критериев оценки опасного состояния резервуаров, математическое моделирование теплового воздействия на соседние резервуары и определение времени перехода между последовательными стадиями развития чрезвычайной ситуации.

Анализ динамических характеристик (гр. 1) показывает, что в процессе выполнения этапов структурной модели функция интегрального пожарного риска $R(t)$ экспоненциально снижается, в то время как уровень технико-

организационной контролируемости аварии $C(t)$ демонстрирует сигмоидальный рост.

Ключевым показателем эффективности разработанных решений является точка стабилизации ($t \approx 10.8$ мин, $R(t) = C(t) \approx 43.8\%$),

Список литературы:

1. Бруслиновский А.Ю., Самигуллин Г.Х., Нефедьев С.А. Моделирование прогрессирующего развития пожароопасной ситуации при хранении нефтепродуктов в стальных резервуарах // *Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России*. 2023. № 2. Очень подходит для вашей темы: рассматривается аварийная разгерметизация резервуара при пожаре, прочность резервуара и возможность каскадного развития пожара.
2. Кожевин Д.Ф., Радова Е.В. Анализ статистических данных о пожарах на объектах, входящих в инфраструктуру нефтяной промышленности // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2025. № 3. С. 99–110. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-99-110.
Это особенно хороший источник для раздела о причинах, условиях возникновения и статистической основе пожарного риска.
3. Красильников А.В., Немчинов М.С. Применение роботизированных установок пожаротушения на складах нефтепродуктов // *Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)*. 2026. № 1. С. 29–36. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-29-36.
4. Аксенов С.Г., Семенов В.А. Газовое пожаротушение для защиты резервуарных парков нефти и нефтепродуктов // *Наука и образование*. 2025. Т. 8. № 1. Работа посвящена применению CO_2 для защиты резервуарных парков, включая вопросы оперативного подавления пламени и снижения вторичного ущерба.
5. Азовцев А.Г., Сырбу С.А., Таратанов Н.А. Моделирование повторяемости возникновения пожаров на резервуарах с нефтью и нефтепродуктами от самовозгорания пирофорных отложений // *Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России*. 2018. Подходит для раздела о причинах возникновения пожаров в вертикальных стальных резервуарах и пирофорных отложениях.
6. Клубань В.С., Федосеева Е.В. О возможности предотвращения выбросов нефти из горящих вертикальных стальных резервуаров. Очень близко к вашей теме: рассматриваются вскипание, выброс горячей нефти, гомотермический слой, необходимость быстрого тушения и предотвращения эскалации пожара.