

В ЭТОМ НОМЕРЕ:**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ****АТМОСФЕРНЫЕ БЛОКИНГИ НАД СИБИРЬЮ И ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ
НА ЕЁ ТЕРРИТОРИИ В 2012-2020 ГГ.**

*Холопцев А. В., Сергеев И. Ю., Батура А. Н.,
Шубкин Р. Г., Бабеньшев С. В.*..... 3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ
ОСВЕЩЕННОСТИ ПОЖАРНЫХ ФОНАРЕЙ В УСЛОВИЯХ
СНИЖЕНИЯ ВИДИМОСТИ В ДЫМУ**

Бессонов Д. В., Девяткин Н. О., Понукалин А. Ю., Криворогова А. С...... 18

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДА
ПРИ ДЕСТРУКТИВНОМ СОБЫТИИ НА НЕФТЕПРОВОДЕ**

Королев Д. С...... 25

**ТУШЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ОЧАГОВ КЛАССА
«В» НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫМИ ОГНЕТУШАЩИМИ
СОСТАВАМИ: ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ЭФФЕКТЫ**

Иванов А. В...... 34

**ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ
ПОЖАРНОГО РИСКА ПРИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ
ПЕРЕВОЗКАХ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ**

Леонтьева М. С...... 45

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОГО УЩЕРБА ОТ ПОЖАРОВ
НА ОБЪЕКТАХ ЗАЩИТЫ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Загуменнова М. В...... 55

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА ПРИ ОЦЕНКЕ
ЗНАЧЕНИЙ ПОЖАРНЫХ РИСКОВ ДЛЯ МНОГОТОПЛИВНЫХ
АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ**

Парфёненко А. П., Тимофеев А. Б., Брюхов Е. Н. 63

**О ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСАХ И ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ
ЯВЛЕНИЯ КАВИТАЦИИ В ПРАКТИКЕ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ**

Савин М. А., Курбатова Д. К., Кацнельсон И. Э...... 77

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА НАДЕЖНОСТИ
МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Субачев С. В., Субачева А. А., Сафронова И. Г.,..... 98

**АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ РИСКА И АНАЛИЗА СЦЕНАРИЕВ
РАЗВИТИЯ ПОЖАРА НА НЕФТЯНОМ ТАНКЕРЕ**

Лоран Н. М...... 115

ПРИМЕНЕНИЕ КАПЕЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА, КАК ОПЕРАТИВНОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ СЕВЕРНЫХ РАЙОНОВ НЕФТЕПРОДУТАМИ РАЗНОГО ВИДА <i>Елфимов Н. В.</i>	121
---	------------

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ГОРЮЧЕСТИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ <i>Беззапонная О. В., Лузина М.Д., Динисламов М.М.</i>	127
---	------------

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

О ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИ ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТЕООБСТАНОВКИ <i>Рыбаков А. В., Усачева Т. В., Иванов Е. В., Шимитило В. Л., Тимарин А. Н., Колобченков М. А.</i>	141
--	------------

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБЩЕЙ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ НАСЕЛЕНИЯ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫМИ НОВООБРАЗОВАНИЯМИ, ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ, А ТАКЖЕ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ И СМЕРТНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ ОТ РАКА ЛЕГКИХ <i>Тростянский С. Н., Федянин В. И., Квашнина Г. А. Шмырева М. Б.</i>	148
---	------------

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА РОБОТОТЕХНИКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ <i>Логинов В. В., Вишняков А. В., Зубарев И. А., Шишкин П. Л.</i>	153
---	------------

УДК 614.841.42

babenyshv@sibpsa.ru

**АТМОСФЕРНЫЕ БЛОКИНГИ НАД СИБИРЬЮ И ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ
НА ЕЁ ТЕРРИТОРИИ В 2012 – 2020 ГГ.****ATMOSPHERIC BLOCKINGS OVER SIBERIA AND FOREST FIRES
ON ITS TERRITORY AT 2012 – 2020 YRS.**

*Холопцев А. В.^{1,2}, доктор географических наук, профессор,
Сергеев И. Ю.², кандидат технических наук,
Батура А. Н.², кандидат технических наук, доцент,
Шубкин Р. Г.², кандидат технических наук,
Бабеньшев С. В.², кандидат физико-математических наук,*

¹Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова», г. Севастополь

²ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
г. Железнодорожск

Kholoptsev A.^{1,2}, Sergeev I.², Batur A.², Shubkin R.², Babenyshv S.²

¹Sevastopol department of State Oceanographic Institute named after N. N. Zubova,
Sevastopol

²FSBEE HE Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia,
Zheleznogorsk

Актуальной проблемой профилактики лесных пожаров в Сибири является выявление участков ее территории, где в современном периоде повторяемость лесных пожаров повышается в периоды возникновения над ними атмосферных блокингов (далее – АБ). Цель работы – выявление таких участков для каждого месяца, в течение которого пожароопасность в лесах является повышенной. Для ее достижения сопоставлена повторяемость лесных пожаров в различных секторах территории Сибири, которые происходили в периоды существования над ними АБ, с их повторяемостью в промежутках между этими периодами. Как фактический материал о лесных пожарах использованы сведения о координатах термоточек типа «лесной пожар», выявленных на территории Сибири в период с 1.04.2012 по 31.10.2020. Для обнаружения АБ применена методика, которая учитывает особенности изменений поля атмосферного давления в тропосфере, возникающих при этих процессах. Для ее осуществления применена информация о вариациях поля атмосферного давления, которая представлена в реанализе ERA5. Это позволило для каждого месяца повышенной пожароопасности определить сектора территории Сибири, где при возникновении АБ повторяемость лесных пожаров повышается.

Ключевые слова: лесные пожары, атмосферные блокинги, реанализ, термоточки, среднесрочный прогноз лесных пожаров.

An urgent problem of prevention of forest fires in Siberia is the identification of areas of its territory, where currently the frequency of forest fires increases during periods of atmospheric blocking. The purpose of this work is to identify such areas for each month in which the forest-fire hazard is increased. To achieve it, the dates were determined when atmospheric blockings occurred over various sectors of the territory of Siberia, and the

frequency of forest fires actually occurring there on these dates was compared with their frequency of occurrence in the intervals between blockings. As factual material on forest fires, information was used on the coordinates of thermal points of the "forest fire" type, detected in Siberia by the global satellite detection systems for the period from 04/01/2012 to 10/31/2020. To detect atmospheric blockings, a technique was used that takes into account changes in the fields of atmospheric pressure in the troposphere during the occurrence of atmospheric blockings of the meridional type. For its implementation, we used information on changes in the atmospheric pressure field in the study period was used, presented in the ERA5 reanalysis. This made it possible for each month of increased fire hazard to determine the sectors of the territory of Siberia, where, in the event of atmospheric blocking, the frequency of forest fires increases significantly.

Keywords: forest fires, atmospheric blocking, reanalysis, thermal anomalies, mid-term prediction of forest fires

Введение

Лесные пожары – одна из основных причин возникновения чрезвычайных ситуаций во многих регионах мира. Поэтому развитие существующих представлений о природных процессах, способствующих их развитию, является актуальной проблемой пожарной, а также экологической безопасности.

Более заинтересованы в решении указанной проблемы регионы, в которых сосредоточена значительная часть лесных ресурсов мира. Одним из них является Сибирь, где размещается более 50 % всех лесных ресурсов России. Как условные границы территории Сибири могут рассматриваться соответствующие участки меридианов 60° в. д. и 170° в. д., расположенные между параллелями 50° с. ш. и 75° с. ш. Лесные пожары в Сибири ежегодно причиняют значительный ущерб населению, экономике и природе России. В XXI в. они возникали наиболее часто на территориях республик Саха (Якутия) и Бурятии, Красноярского и Забайкальского края, а также Иркутской и Амурской области [1, 2].

Согласно существующим представлениям о факторах пожароопасности в лесах, к наиболее существенным относятся метеорологические [3]. Среди последних важное место занимают изменения продолжительности периода засушливой погоды, что приводит к уменьшению запасов влаги в растительности, валежнике и почве, способствующему распространению пламени.

Чем дольше существуют в регионе подобные метеоусловия, тем больше масштабы возникающих в нем лесных пожаров и тем сложнее их ликвидировать [4, 5].

Указанные закономерности учтены в методике прогнозирования пожароопасности в лесах, предложенной первоначально В. Г. Нестеровым [6], а также в её последующих версиях [7, 8]. Именно такая методика применяется ныне подразделениями лесной охраны и ГПС МЧС России при планировании их основной деятельности, в том числе и мероприятий, направленных на профилактику лесных пожаров в зонах их ответственности [9].

Наиболее продолжительные периоды засушливой погоды на любой такой территории наблюдаются при возникновении над ней так называемого атмосферного блокинга (далее – АБ), который образуют высокие малоподвижные антициклоны, способные сохранять свое расположение от суток до недель [10]. На учете расположений в Северном полушарии АБ основан подход к типизации макроциркуляционных процессов, который был предложен Б. Л. Дзердзеевским [11].

Современные представления о причинах возникновения АБ изложены в работах многих отечественных и зарубежных авторов (для обзора см. [10]). Ими установлено, что одной из АБ может служить крупномасштабная неустойчивость зонального потока. Последняя способна при-

водить к образованию системы взаимодействующих между собой антициклона и циклона (блокирование расщепляющегося типа) или мощного барического гребня и двух циклонов (омега-блокирование). Упомянутый тип блокирования преобладает над Атлантикой и Европой, а также над Дальним Востоком и Тихим океаном [12].

Над Сибирью и Уралом более распространены АБ второго (меридионального) типа, которые связаны с вторжениями арктического воздуха (далее – ВАВ) [11] и обтеканием воздушными течениями орографических неоднородностей земной поверхности [12].

В периоды существования АБ меридионального типа над соответствующими территориями формируются субмеридиональные барические гребни, связывающие Арктический и Субтропический антициклон, что приводит к приостановке Западного переноса воздушных масс. При этих процессах повышение атмосферного давления, а также геопотенциала различных изобарических поверхностей происходит не только в пределах тропосферы, но также в тропопаузе и нижней стратосфере [13].

При возникновении ВАВ влажный воздух, перемещавшийся ранее в субзональном направлении, отклоняется к северу, что активизирует его термическую трансформацию [14]. В результате этого на территориях, расположенных к западу от ВАВ, интенсивность атмосферных осадков повышается. На реках, в бассейнах которых выпадают эти осадки, могут возникнуть опасные гидрологические явления [15].

В теплый период года, при продвижении в низкие широты сравнительно сухого арктического воздуха, над сушей он быстро прогревается, что приводит к еще большему снижению его относительной влажности и точки росы. Поэтому на территориях материков, над которыми возникает АБ меридионального типа, засушливость метеоусловий увеличивается, а атмосферные осадки прекращаются.

Чем дольше существует АБ, тем выше риск возникновения засухи [16], тем более благоприятными для распространения огня становятся метеоусловия. Поэтому по мере увеличения продолжительности АБ риск возникновения обширных пожаров на любых лесопокрытых территориях возрастает. На каждой такой территории повышение пожароопасности зависит не только от продолжительности ВАВ, но и от характеристик ее фитоценозов и почв, а также запасов содержащейся в них влаги. Поэтому подобные последствия АБ существенно зависят от ее географического положения, месяца, а также ее ландшафтов.

Для выявления АБ, обусловленных ВАВ, изначально применялась методика, предложенная Б. Л. Дзердзеевским [11]. Решение о наличии АБ принималось по результатам анализа суточной синоптической карты, отражающей распределение в Северном полушарии приведенного к уровню моря атмосферного давления. Обнаружение АБ над изучаемой территорией, происходило, если на этой карте в соответствующем диапазоне долгот существовал барический гребень, простирающийся между Арктикой и соответствующим Субтропическим антициклоном. Учитывались барические гребни, где приведенное атмосферное давление превосходило 1015 гПа на заданную величину $L > 0$.

Несмотря на кажущуюся простоту этой методики, ныне она применяется редко, поскольку она весьма трудоемка и иногда приводит к ошибкам. Без участия человека, обладающего навыками анализа синоптических карт, ее реализовать невозможно. Ошибки возникают не только по невнимательности, но и из-за того, что по упомянутым картам невозможно установить проявляются ли выявленные барические гребни в прочих слоях тропосферы.

Более совершенной является методика выявления АБ, предложенная в 1983 г. Лежёнасом и Оклендом (см. [12]). Последняя основана на том, что при отсутствии АБ в тропосфере умеренных широт

Северного полушария преобладает Западный перенос воздушных масс, а меридиональный градиент геопотенциала направлен в сторону экватора. Значение модуля этого градиента максимально в широтном поясе $40 - 60^\circ$ с. ш.

Решение об обнаружении АБ принимается, если эта закономерность нарушается в течение не менее чем 5 суток в пределах сектора шириной не менее 10° . Для выявления подобных нарушений проверяется выполнимость условия:

$$I(l-10) + I(l) + I(l+10) < 0, \quad (1)$$

где: $I(l) = H(l, 40^\circ \text{ с. ш.}) - H(l, 60^\circ \text{ с. ш.})$ – индекс Лежёнаса – Окленда;

H – высота изобарической поверхности 500 мб;

l – долгота.

Информация, необходимая для такой проверки, может быть получена из реанализа изменений высоты изобарической поверхности 500 гПа, вследствие чего участие в ней человека обязательным не является. Несмотря на то, что и эта методика не позволяет проверить наличие признаков АБ на других изобарических поверхностях, к ошибкам она приводит значительно реже, вследствие чего она применяется современными авторами.

Влияние АБ, происходивших во второй половине XX – начале XXI в. над европейской территорией России и Сибирью, на засушливость метеоусловий на их степных и лесостепных территориях, изучено в [10; 16]. При этом изменения повторяемости крупных пожаров на территориях лесной ландшафтной зоны при возникновении над ними АБ ранее не рассматривались, хотя для каждых суток из периода с 1.01.2012 по 31.12.2020. обнаружение таких пожаров на любых участках земной поверхности производит спутниковая система глобального мониторинга термических аномалий [17].

В упомянутой системе фактически выявляются участки земной поверхности, где средняя температура повышена по отношению к их окружению не менее чем на 70°C (им соответствуют так называемые

термоточки). Для этого применяются инструменты MODIS и VIIRS, осуществляющие радиометрическую съемку всей поверхности Земли в инфракрасном и видимом диапазонах. Абсолютные координаты ИСЗ каждой обнаруженной термоточки определяются с использованием системы глобального позиционирования спутников (GPS).

В России наземные станции космического мониторинга пожаров расположены в Москве, Вологде, Красноярске и Владивостоке. При появлении в зоне радиовидимости таких станций ИСЗ они принимают информацию о координатах всех термоточек, обнаруженных ИСЗ за текущие сутки. На основании на этой информации для каждой обнаруженной термоточки, определяется ее тип (что позволяет выявить среди них те, которые соответствуют лесным пожарам). Сведения о координатах всех обнаруженных таким способом лесных пожаров поступают в информационную систему «Рослесхоз» [2], которая предоставляет их пользователям. Тем не менее, ранее участки территории Сибири, где при возникновении АБ меридионального типа повторяемость лесных пожаров повышается, выявлены не были.

Цель работы – выявление таких участков для различных месяцев повышенной пожароопасности.

Материалы и методы

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1. Выявлены даты, относящиеся к месяцам апрель – октябрь, в которые АБ возникали в различных секторах территории Сибири.

2. Для каждого такого сектора и для АБ различной минимальной продолжительности ($T_{\text{АБ}}$) проведена оценка повторяемости лесных пожаров, обнаруживаемых в даты существования над ним таких АБ (P_1), а также аналогичного показателя для промежутков между этими датами (P_2).

Цель исследования достигалась путем сравнения значений $P1$ и $P2$ для каждого месяца, каждого сектора и каждого значения T_{AB} . Учитывая это как фактический материал о повторяемости лесных пожаров, происходивших в те или иные сутки на территории Сибири, использована информация из базы данных [17]. Упомянутая информация включает сведения о координатах всех термоточек типа «лесной пожар», возникавших в месяцы апрель – октябрь на всей лесопокрытой территории Сибири, ограниченной меридианами 60° в. д. и 170° в. д. и параллелями 50° с. ш. и 70° с. ш.

Для обнаружения АБ меридионального типа использована методика, обобщающая упомянутые выше методики, которая учитывает свойства выявляемых барических неоднородностей более полно. Методика учитывает, что при возникновении АБ меридионального типа в соответствующем секторе повышается как атмосферное давление в приземном слое атмосферы, так и высоты всех изобарических поверхностей, относящихся к тропосфере. Как и в традиционной методике, предполагается, что T_{AB} может составлять 5 суток или более. Решение об обнаружении в рассматриваемом секторе АБ принимается, если в течение времени не менее T_{AB} во всех относящихся к нему узлах координатной сетки реанализа, расположенных между параллелями 50° с. ш. и 70° с. ш., выполняются условия:

- приведенное к уровню моря атмосферное давление превышает 1015 гПа на заданную величину L ;
- значения геопотенциала соответствующих изобарическим поверхностям 300 , 500 и 850 гПа, в рассматриваемые даты, превышает среднемесячные значения этих показателей не менее, чем на U (m^2/c^2);
- критерий Лежёнаса - Окленда выполняется для изобарических поверхностей не только 500 гПа, но также 300 и 850 гПа.

Несмотря на более высокую сложность такой методики, очевидно, что свойства АБ меридионального типа в ней учитываются более полно. Вследствие этого при ее применении вероятности принятия ложных решений о наличии АБ могут быть меньше, чем при использовании упомянутых выше традиционных методик.

Учитывая особенности предложенной методики, как фактический материал использована информация реанализа ERA5 об изменениях приведенного к уровню моря атмосферного давления в приземном слое атмосферы, а также значений геопотенциала, соответствующих изобарическим поверхностям 300 , 500 и 850 гПа [18].

Упомянутый реанализ получен с использованием математических моделей IMERG [19]. При их верификации используются результаты как наземных, так и спутниковых наблюдений, которые ассимилируются и обрабатываются с использованием цикла 41r2 Интегрированной системы прогнозирования (IFS). Реанализ ERA5 поддерживается Европейским центром среднесрочных прогнозов и производится службой по изменению климата Copernicus.

Выборочное сопоставление информации о приведенном атмосферном давлении из реанализа ERA5 с синоптическими картами Росгидромета показало, что при $L = 0$ обнаруживаемые по этой информации барические гребни расположены там же. При этом на некоторых участках их периферий иногда присутствуют области низкого давления, отсутствующие на картах. Последнее, по-видимому, обусловлено погрешностями реанализа. При увеличении L площадь барического гребня, построенного по результатам реанализа, уменьшается, как и размеры упомянутых областей. Начиная с $L = 5$ гПа подобных областей не выявлено. Сопоставление информации о значениях геопотенциала 300 , 500 и 800 гПа, представленной в реанализе ERA 5, с соответствующими картами Росгидромета показало, что отличия между ними

ликвидируются при задании Y не менее чем $200 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Поэтому предполагалось, что $L = 5$ гПа, $Y = 200 \text{ м}^2/\text{с}^2$, а $T_{\text{АБ}}$ принадлежит к диапазону 5 – 10 суток. При формировании изучаемых временных рядов значений повторяемости лесных пожаров территория Сибири разбита на 440 секторов шириной $0,25^\circ$. В каждом таком секторе вдоль соответствующего меридиана располагалось (с шагом $0,25$ градусов) по 80 узлов координатной сетки реанализа ERA5.

При решении первой задачи с использованием изложенной методики для каждого месяца из периода с апреля 2012 г. по октябрь 2020 г. определялись даты, в которые над тем или иным сектором территории Сибири существовали АБ меридионального типа. Если АБ начинался в одном месяце, а заканчивался в другом, вся его длительность относилась к тому месяцу, к которому принадлежала большая часть периода его существования.

При решении второй задачи для каждого месяца и каждого сектора вычислены значения $P1$ и $P2$.

Значение $P1$ вычислялось как среднее за 2012–2020 гг. суммарное количество термоточек типа «лесной пожар», которые обнаружены для этого месяца в рассматриваемом секторе, в даты, для которых над ним были обнаружены АБ, продолжительность которых превышала заданное $T_{\text{АБ}}$.

Значение $P2$ вычислялось как среднее за 2012 – 2020 гг. суммарное количество термоточек типа «лесной пожар», которые обнаружены для этого месяца в рассматриваемом секторе, в даты, для которых над ним АБ обнаружено не было.

Решение о наличии повышения в некотором месяце и некотором секторе повторяемости лесных пожаров при возникновении АБ принималось, если $P1 - P2 > 0$. Выявлялись сектора территории Сибири, где подобное повышение в том или ином месяце было наибольшим.

Нетрудно видеть, что основным фактором неопределенности при осуществлении рассматриваемых исследований является небольшая продолжительность периода времени, в течение которого осуществлялся спутниковый мониторинг термических аномалий типа «лесной пожар». Поэтому для подтверждения статистической устойчивости полученных результатов, исследования по той же методике целесообразно было бы через несколько лет повторить.

Результаты

С использованием изложенной методики и фактического материала для каждого месяца, каждого сектора территории Сибири и для всех рассматриваемых $T_{\text{АБ}}$ оценены значения $P1-P2$. Кроме того для различных частей территории Сибири и для $T_{\text{АБ}} = 5$ суток вычислены средние значения этих показателей, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1
Средние значения $P1-P2$ для $T_{\text{АБ}} = 5$ суток для различных частей Сибири

Месяц	Западная Сибирь (диапазон долгот 60-90°в.д.)	Восточная Сибирь (диапазон долгот 90-150°в.д.)	Северо-Восточная Сибирь (диапазон долгот 150-170°в.д.)	Среднее
Апрель	0,0048	-0,1258	-0,0005	-0,0618
Май	0,0205	-0,1796	-0,0026	-0,0853
Июнь	0,0304	0,1158	0,0686	0,0827
Июль	-0,0110	0,1431	0,0360	0,0778
Август	-0,0032	-0,0055	0,0260	0,0031
Сентябрь	-0,0005	0,2149	0,0015	0,1077
Октябрь	0,0024	0,0213	0,0002	0,0113

Из данных табл.1 следует, что средние значения изменений повторяемости лесных пожаров на территориях разных регионов Сибири в периоды возникновения рассматриваемых АБ относительно невелики и существенно зависят от месяца, для которого они оценены. При этом для таких месяцев, как апрель и май в периоды АБ значения рассматриваемых характеристик в среднем по территории Сибири снижаются, а для прочих месяцев увеличиваются. Аналогичные закономерности проявляются и при других рассматривавшихся значениях T_{AB} . При этом по мере увеличения T_{AB} значения рассматриваемых показателей для месяцев июнь–октябрь увеличиваются, а для месяцев апрель и май умень-

шаются. При $T_{AB} = 10$ суток средние значения $P1-P2$ для месяцев июнь–октябрь для всех регионов Сибири положительны.

Для выяснения причин, обуславливающих выявленные закономерности, осуществлен анализ зависимостей значений $P1-P2$ для различных месяцев и различных секторов, от соответствующих значений их средней долготы.

Для облегчения пространственного восприятия результатов этого анализа, на рис. 1 представлено распределение по территории Сибири повторяемости лесных пожаров на различных ее участках (частоты обнаружения термоточек типа «лесной пожар») в апреле–июле 2012–2020 гг., которое построено по данным [17].

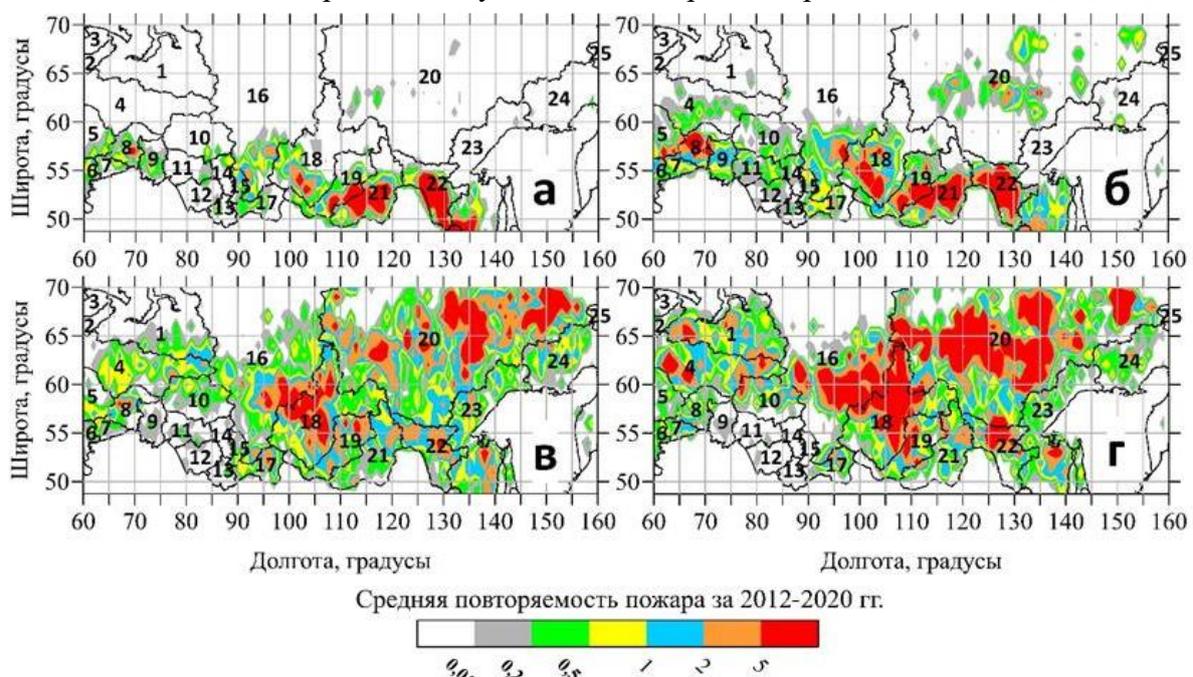


Рисунок 1. Распределение по территории Сибири повторяемости обнаружения термоточек типа «Лесной пожар» в апреле–июле 2012–2020 гг. (по данным [1]).

а) апрель; б) май; в) июнь; г) июль.

Из данных рис. 1 понятно, что в апреле лесные пожары возникают преимущественно на юге Сибири, где в этом месяце таяние снежного покрова завершилось, а валежник и почва подсохли. В мае пожары постепенно смещаются к северу. В июне и в особенности в июле они вероятны практически в любых зонах Сибири.

На рис. 2 представлены примеры зависимости $P1-P2$ в различных секторах территории Сибири от среднего значения

их долготы, которые соответствуют месяцам апрель и май, а также $T_{AB} = 5$ суток и 6 суток. Из данных рис. 2а видно, что для апреля снижение пожароопасности при возникновении АБ характерно для многих секторов территории Сибири. Сравнение рис. 2а и 1а свидетельствует о том, что указанный эффект может быть обусловлен тем, что в апреле на многих участках территорий рассматриваемых

секторов еще не сошли снега и возникновение АБ приводит на них не к потеплению, а к похолоданию. В результате этого в южных районах Сибири, где снег уже сошел и могут возникать лесные пожары, при возникновении АБ, температуры приземного воздуха снижаются, интенсивность

испарения влаги уменьшается, что приводит к снижению пожароопасности. Наиболее ярко проявляется этот эффект в секторах, соответствующих долготам 112,5–113° в. д. (южные районы Иркутской области и прилегающие к ним районы республики Бурятия) и 126,5–132° в. д. (Забайкальский край).

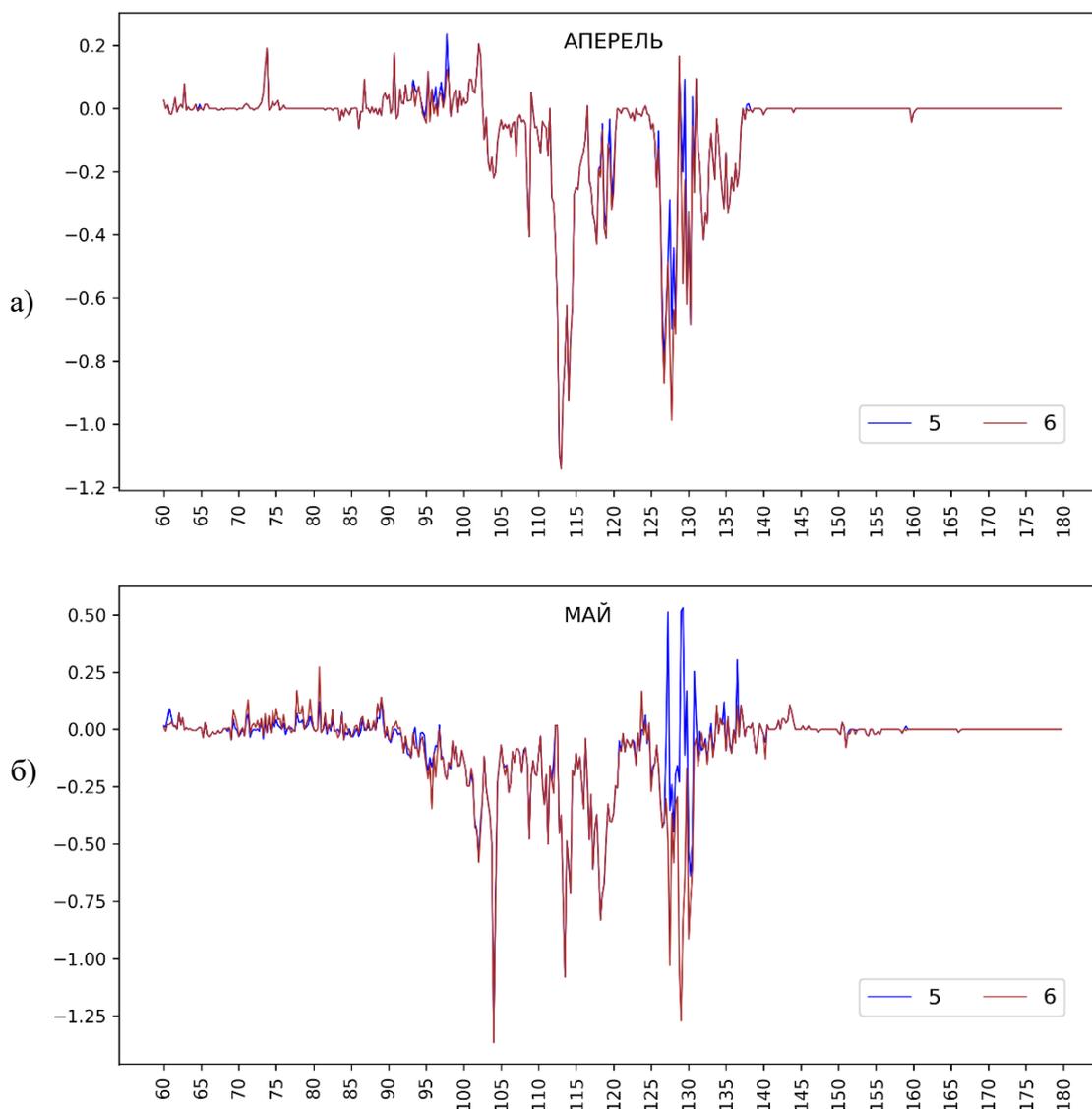


Рисунок 2. Зависимости от средней долготы секторов территории Сибири соответствующих им значений разности $P1-P2$ для месяцев:
а) апрель; б) май.

Как следует из данных рисунка 1б, в целом аналогичная картина наблюдается и для мая. В этом месяце возникновение АБ практически повсеместно приводит к снижению пожароопасности. Сопоставление рис. 2б и 1б позволяет заключить, что

наиболее заметно при АБ пожароопасность снижается в секторах 102,5–106° в. д. (юго-запад Иркутской области), 114–115° в. д. (юго-восток Республики Бурятия и граничащие районы Забайкаль-

ского края), 118–119° в.д (северо-восток Забайкальского края), а также 126,5–132° в.д. (Амурская область). При этом в секторах 127,5–130° в.д (север Амурской области) при возникновении АБ средняя повторяемость лесных пожаров несколько возрастает.

Таким образом, в апреле и мае возникновение АБ в 2012–2020 гг. практически на всей территории Сибири приводило

к снижению повторяемости лесных пожаров, которое наиболее ощутимым было в районах, где повторяемость лесных пожаров была повышена.

На рис. 3 приведены зависимости от средней долготы секторов территории Сибири соответствующих им значений разности $P1-P2$ для всех летних месяцев.

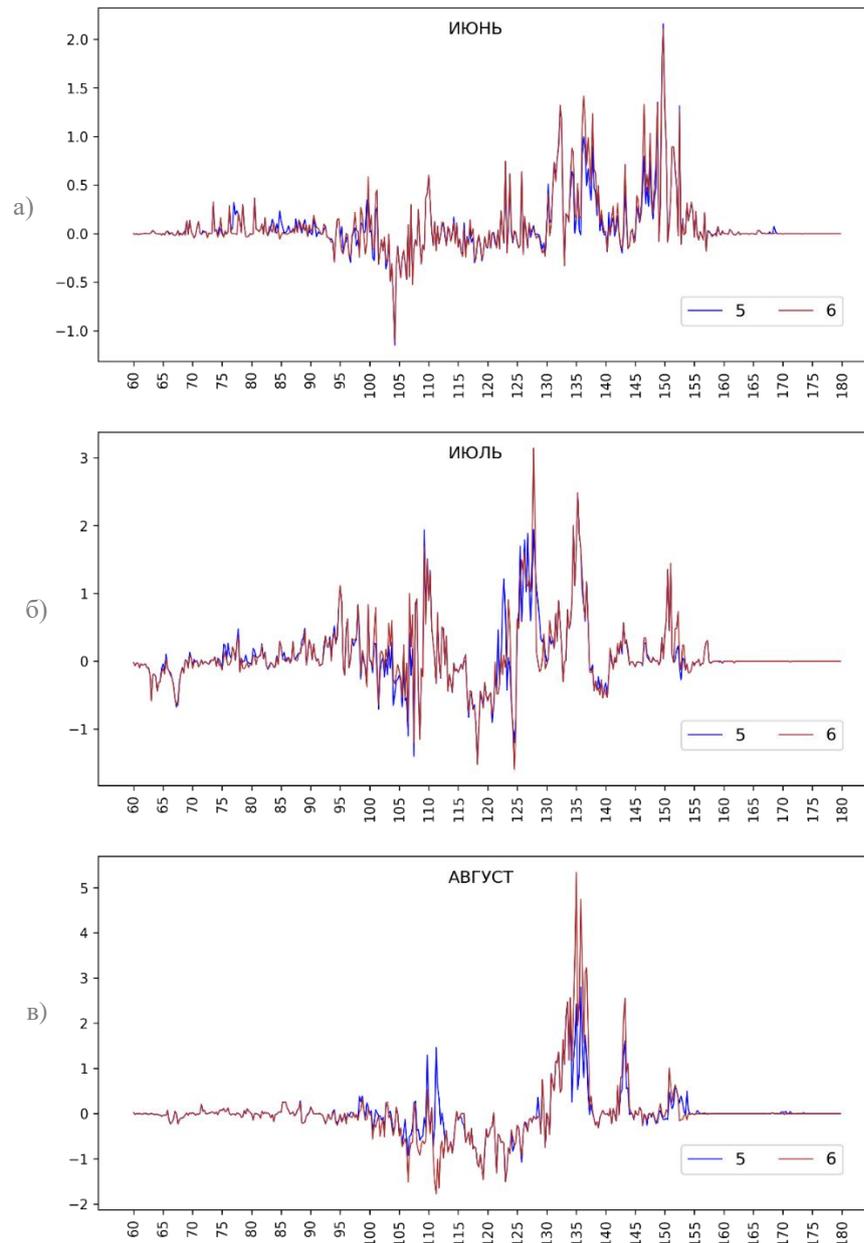


Рисунок 3. Зависимости от средней долготы секторов территории Сибири соответствующих им значений разности $P1-P2$ для месяцев:
а) июнь; б) июль; в) август

Рис. 3а и рис. 1в показывают, что для июня снижение повторяемости лесных пожаров в периоды возникновения АБ отмечалось только в секторе $103,5-104,5^\circ$ в.д. (юго-запад Иркутской области). При этом из данных табл. 1 следует, что в среднем по территории Сибири при этих явлениях повторяемость лесных пожаров увеличивалась. Это увеличение было наиболее ощутимо в секторах $131,25-132,5^\circ$ в.д., $136-138^\circ$ в.д., $146,25-150,25^\circ$ в.д., (Республика Саха (Якутия)). В секторе $149,75^\circ$ в.д. при АБ количество обнаруживаемых здесь термоточек в среднем за 2012–2020 гг. превышало аналогичный показатель между этими периодами на 2.

Из рис. 3б, а также рис. 1г следует, что на территории Сибири в 2012–2020 гг. существовали сектора, где при АБ, происходивших в июле, средняя повторяемость лесных пожаров снижалась. Таких секторов было не много. Подобное имело место в секторах $106,5-110,25^\circ$ в.д. (Красноярский край), $117,5-118,5^\circ$ в.д. и $124-124,75^\circ$ в.д. (Республика Саха (Якутия)). На преобладающей части территории Сибири (кроме Западной Сибири) в периоды возникновения АБ значение разности $P1-P2$ было положительным, а во многих секторах превышало 1. Наибольшее значение этого показателя, характеризующего значимость влияния АБ на повторяемость лесных пожаров, составляло 3,14 (в секторе $127,75^\circ$ в.д. (Республика Саха (Якутия)).

Как видно из рис. 3в, еще более сильным было влияние АБ на повторяемость лесных пожаров в августе. В секторах $106,5-128^\circ$ в.д., при этих процессах повторяемость случаев обнаружения термоточек «лесной пожар» уменьшалась (значения $P1-P2$ достигали уровней меньше –1). Как следует из сравнения данного рис. и табл. 1, повторяемость лесных пожаров при АБ снижалась на территориях Западной Сибири, Красноярского края и западных улусов Республики Саха (Якутия). При этом в секторах, расположенных

восточнее ($129-136^\circ$ в.д. и $142-144^\circ$ в.д. (прочая территория Республики Саха (Якутия)), возникновение АБ приводило к значительному увеличению повторяемости лесных пожаров.

Максимальное значение $P1-P2$ для августа составляло 5,34. Подобное имело место в секторе 135° в.д., соответствующем долине реки Яна (Республика Саха (Якутия)).

Выявленные закономерности свидетельствуют о том, что летом на территориях Восточной и Северо-Восточной Сибири, климат которых является более аридным, возникновение АБ продолжительностью 5 суток и более в 2012–2020 гг. вызывало существенное увеличение повторяемости лесных пожаров. В то же время на территориях, климат которых менее аридный (Западная Сибирь и Красноярский край), возникновение АБ такой продолжительности приводило к снижению повторяемости лесных пожаров.

Аналогичные исследования, выполненные с тем же фактическим материалом для случая, когда T_{AB} составило 10 суток, показали, что при этих явлениях существенное повышение повторяемости лесных пожаров в летние месяцы происходило повсеместно, что соответствует выводам [15].

На рис. 4 представлены распределения по территории Сибири оценок повторяемости лесных пожаров для месяцев август–октябрь, построенные по информации [17].

Из рис.4 следует, что в августе–октябре 2012–2020 гг. лесные пожары происходили в основном на территориях Восточной и Северо-Восточной Сибири (Республика Саха (Якутия), Иркутская область). Повторяемость этих процессов всюду убывала от августа к октябрю.

На рис. 5 отображены зависимости $P1-P2$ в различных секторах территории Сибири от их средней долготы, для месяцев сентябрь и октябрь.

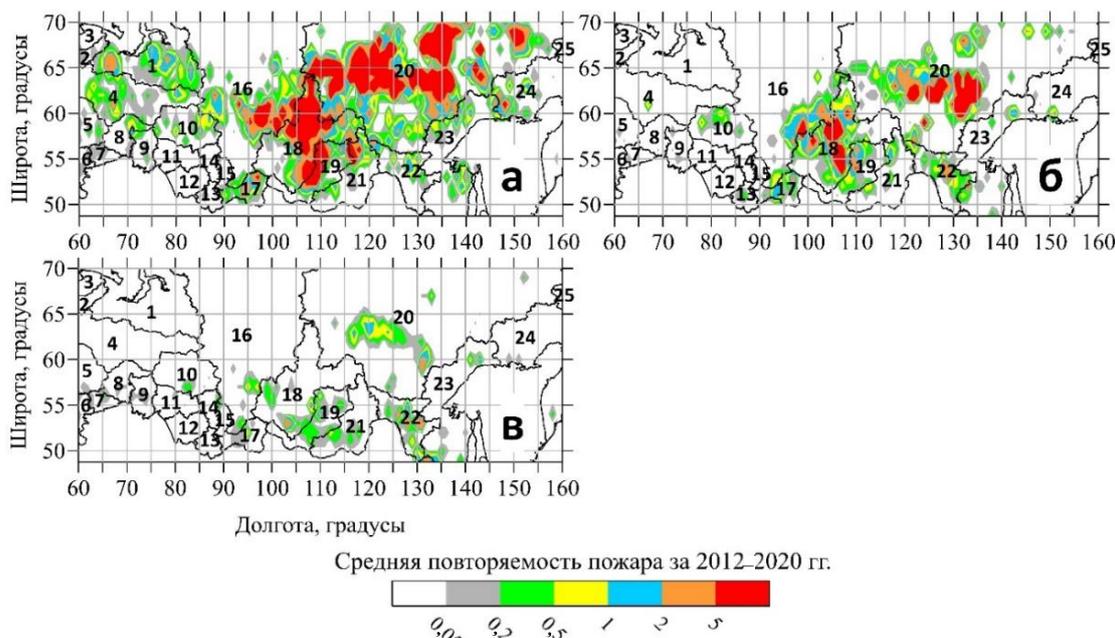


Рисунок 4. Распределение по территории Сибири средней повторяемости обнаружения термоточек типа «лесной пожар» в апреле–июле 2012–2020 гг. (по данным [17]): а) август; б) сентябрь; в) октябрь

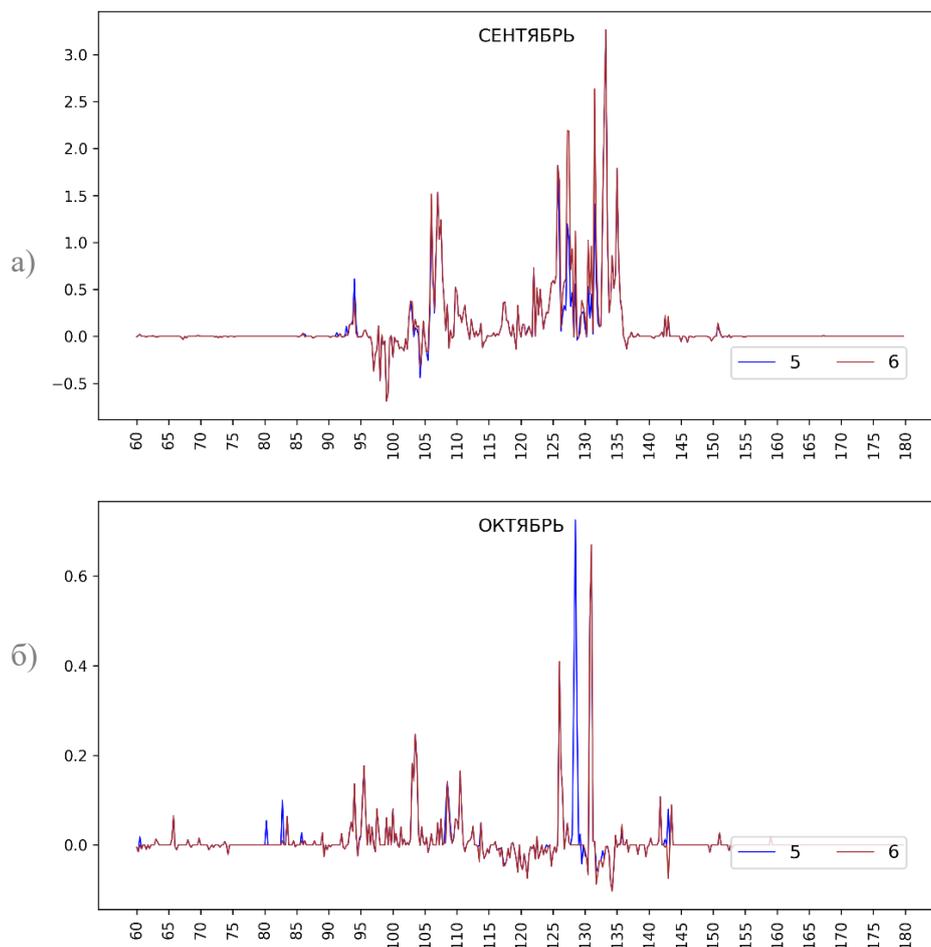


Рисунок 5. Зависимости от средней долготы секторов соответствующих им значений разности $P1-P2$ для месяцев: а) сентябрь; б) октябрь

Рис. 5 свидетельствует о том, что в сентябре и октябре сектора, в которых возникновение АБ приводило к изменениям повторяемости лесных пожаров, располагались в основном на территориях Восточной Сибири. Как следует из табл. 1 и рис. 4, 5 и, для указанных месяцев при возникновении АБ повторяемость лесных пожаров в 2012–2020 гг. увеличивалась.

По данным рисунка 5а и 4б не трудно заметить, что для сентября, при возникновении АБ, увеличение повторяемости лесных пожаров происходило в секторах $106\text{--}107^\circ$ в. д. (Иркутская область), $126\text{--}128^\circ$ в. д. $132\text{--}136^\circ$ в. д. (Республика Саха (Якутия)). Рис. 5б и 4в позволяют заключить, что для октября аналогичное явление происходило в секторе $128\text{--}130^\circ$ в. д. (на территории республики Саха (Якутия)).

Таким образом, из рис. 1–5 следует, что АБ, возникающие в месяцы повышенной пожароопасности, оказывают наиболее существенное влияние на изменения повторяемости лесных пожаров на тех территориях, где значения этой характеристики являлись повышенными. В апреле и мае возникновение АБ приводит к снижению повторяемости лесных пожаров, при $T_{\text{АБ}}$ в пределах от 5 до 10 суток. В летние месяцы, при $T_{\text{АБ}} = 5$ или 6 суток, возникновение АБ на территориях Восточной и Северо-Восточной Сибири, как правило, приводит к увеличению повторяемости лесных пожаров. При этом на территориях Западной Сибири и Красноярского края повторяемость лесных пожаров несколько уменьшается. При $T_{\text{АБ}} = 10$ суток повторяемость лесных пожаров летом повышается во всех секторах территории Сибири. В осенние месяцы при любой длительности АБ возникновение этих процессов приводит к повышению повторяемости лесных пожаров в Восточной Сибири.

Дискуссия

Полученные результаты в полной мере соответствуют существующим представлениям об АБ и их последствиях [11–13, 15]. Они также подтверждают справедливость существующих представлений о

причинах возникновения лесных пожаров и факторах, способствующих их развитию [3–5].

Пространственное соответствие расположений областей, где повторяемость лесных пожаров в 2012–2020 гг. была повышена, а также секторов, в которых АБ оказывали наиболее сильное влияние на нее, не удивительно, поскольку ширина фронта учитываемых АБ превышала 10° . Пространственные масштабы областей, где повторяемость лесных пожаров была повышенной, значительно меньше, вследствие чего основное влияние на расположение выявляемых секторов оказывала именно она. Последнее подтверждают и выявленные сезонные изменения значений разности $P_1\text{--}P_2$, пиковое значение которой приходится на август.

Из этого следует, что выявленные расположения секторов, где изменения повторяемости лесных пожаров при АБ наиболее ощутимы, при осуществлении аналогичных исследований для другого интервала времени могут измениться. Подобное предположение основано на том, что горимость тех или иных лесопокрытых территорий зависит не только от метеоусловий, но и от запасов на них горючего материала, в изменениях которых присутствуют свои циклы, зависящие от соответствующих им лесобразующих пород. Поэтому вопрос о статистической устойчивости расположений выявленных секторов нуждается в дополнительном исследовании, которое станет возможным лишь по прошествии еще нескольких лет.

Следует отметить также, что кроме АБ меридионального типа (на учете свойств которых построена применявшаяся методика обнаружения) над территорией Сибири возможны также АБ, обусловленные крупномасштабной неустойчивостью зонального потока (блокирование расщепляющегося типа и омега-блокирование). Такие АБ применявшейся методикой обнаружения этих процессов не учитываются. Вследствие этого, полученные

результаты могут лишь качественно соответствовать действительности. Тем не менее, АБ меридионального типа над Сибирью преобладают, вследствие чего нам представляется, что полученные результаты к действительности весьма близки.

Выявленные закономерности свидетельствуют о целесообразности учета изменений повторяемости АБ при среднесрочном и долгосрочном прогнозировании повторяемости лесных пожаров на территории Сибири в месяцы с июня по сентябрь (когда эти процессы способствуют повышению горимости лесов).

Как следует из полученных результатов, при АБ, происходящих в апреле и мае, повторяемость лесных пожаров в Сибири снижается, а при тех же процессах в июне–сентябре – повышается. Последнее свидетельствует о существенности влияния на последствия АБ меридионального типа характеристик подстилающей поверхности, над которой распространяются соответствующие ВАВ, что целесообразно учитывать при совершенствовании методик долгосрочного прогнозирования лесных пожаров. Поскольку на состояние подстилающей поверхности существенно влияют антропогенные факторы (вырубка лесов, антропогенное загрязнение окружающей среды и др.), зависят от них и рассматриваемые последствия возникновения АБ. Указанную связь целесообразно учитывать при планировании подразделениями ГПС МЧС РФ профилактических мероприятий в зонах своей ответственности.

Выводы

Таким образом, полученные результаты подтверждают справедливость существующих представлений о том, что АБ меридионального типа при любой своей продолжительности (начиная с $T_{AB} = 5$ суток) оказывают существенное влияние на развитие лесных пожаров. Из них следует, что в месяцы апрель и май при возникновении АБ повторяемость лесных пожаров снижается, а в летние и осенние месяцы – повышается (наиболее существенно в августе). Чем больше T_{AB} , тем с большей вероятностью при возникновении над территорией Сибири АБ, в месяцы июнь–октябрь повторяемость лесных пожаров повышается. При $T_{AB} = 10$ суток это явление происходит всегда и повсеместно. АБ оказывают наиболее ощутимое влияние на изменения повторяемости лесных пожаров на тех территориях, где повторяемость лесных пожаров повышена. Вследствие этого их прогнозы для таких территорий целесообразно учитывать при планировании основных мероприятий подразделений ГПС МЧС РФ.

Перспективным направлением дальнейших исследований в области совершенствования методик долгосрочного прогнозирования лесных пожаров является разработка методики выявления АБ, учитывающей все виды блокирования, а также оценка тенденций междекадных изменений повторяемости АБ над различными лесопокрытыми территориями.

Литература

1. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства: официальный сайт. URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 22.09.2022).
2. Тимофеева С. С., Гармышев В. В. Оценка пожарной опасности субъектов Российской Федерации Сибирского федерального округа на основе комплексного показателя пожарных рисков // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2 (14). С. 3059–3064.
3. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы. М., 2004. 312 с.
4. Дроздова Т. И., Сороковикова Е. В. Анализ лесных пожаров в Иркутской области в 2010–2019 гг. // *XXI век. Техносферная безопасность*. 2021. № 6 (1). С. 29–41.
5. Чуйков А. М., Сметанкина Г. И., Дорохова О. В. Проблемы снижения уровня пожарной опасности территорий, расположенных в зоне риска лесных пожаров // *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2019. № 1 (10). С. 465–468.

6. Расчет комплексного показателя пожарной опасности в лесах. URL: <http://method.meteorf.ru/danger/fire/calculate/calculate.html> (дата обращения: 22.09.2022).
7. Сверлова Л. И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. Хабаровск, 2000. 46 с.
8. Егармин П. А., Каверзин И. В. Методика краткосрочного прогнозирования пожарной опасности в лесах по условиям погоды // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2010. № 26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-kratkosrochnogo-prognozirovaniya-pozharnoy-opasnosti-v-lesah-po-usloviyam-pogody> (дата обращения: 22.09.2022).
9. ГОСТ Р 22.1.09-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. М., 1999. 11 с.
10. Мохов И. И. и др. Блокинги в Северном полушарии и Евроатлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 5. С. 1–5.
11. Дзердзеевский Б. Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере северного полушария в XX столетии. М., 1968. 240 с.
12. Мохов И. И. Атмосферные блокинги и связанные с ними климатические аномалии. Нелинейные волны. 2016. URL: <https://docplayer.com/35005034-Atmosfernye-blokingi-i-svyazannye-s-nimi-klimaticheskie-anomalii.html> (дата обращения: 22.09.2022).
13. Холощев А. В., Батраков Г. Ф. Вторжения арктического воздуха и обмен между тропосферой и нижней стратосферой // Процессы в геосредах. 2021. № 2 (28). С. 1155–1160.
14. Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология. М., 2012. 584 с.
15. Мохов И. И. Экстремальные атмосферные и гидрологические явления в российских регионах: связь с Тихоокеанской декадной осцилляцией // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 183–188.
16. Золотокрылин А. Н. и др. Сравнительные исследования засух 2010 и 2012 г. на Европейской территории России по метеорологическим и MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 246–253.
17. База данных «Координаты термических точек». URL: <https://www.mchs.gov.ru/ministerstvo/otkrytoe-ministerstvo/otkrytye-dannye/7707034952-ThermoPoints> (дата обращения: 22.09.2022).
18. Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production // ECMWF Newsletter. 2016. Vol. 147. P. 7.
19. IMERG: Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM | NASA. URL: <https://gpm.nasa.gov/data/imerg> (дата обращения: 22.09.2022).

References

1. Informacionnaya sistema distancionnogo monitoringa Federal'nogo agentstva lesnogo hozyajstva: oficial'nyj sajt. URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (data obrashcheniya: 22.09.2022).
2. Timofeeva S. S., Garmyshev V. V. Ocenka pozharnoj opasnosti sub"ektov Rossijskoj Federacii Sibirskogo federal'nogo okruga na osnove kompleksnogo pokazatelya pozharnyh riskov // Fundamental'nye issledovaniya. 2015. № 2 (14). S. 3059–3064.
3. Vorob'ev YU. L., Akimov V. A., Sokolov YU. I. Lesnye pozhary na territorii Rossii: Sostoyanie i problemy. M., 2004. 312 s.
4. Drozdova T. I., Sorokovikova E. V. Analiz lesnyh pozharov v Irkutskoj oblasti v 2010–2019 gg. // XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2021. № 6 (1). S. 29–41.
5. Chujkov A. M., Smetankina G. I., Dorohova O. V. Problemy snizheniya urovnya pozharnoj opasnosti territorij, raspolozhennyh v zone riska lesnyh pozharov // Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij. 2019. № 1 (10). S. 465–468.
6. Raschet kompleksnogo pokazatelya pozharnoj opasnosti v lesah. URL: <http://method.meteorf.ru/danger/fire/calculate/calculate.html> (data obrashcheniya: 22.09.2022).
7. Sverlova L. I. Metod ocenki pozharnoj opasnosti v lesah po usloviyam pogody s uchetoм pojasov atmosfernoј zasushlivosti i sezonov goda. Habarovsk, 2000. 46 s.
8. Egarmin P. A., Kaverzin I. V. Metodika kratkosrochnogo prognozirovaniya pozharnoj opasnosti v lesah po usloviyam pogody // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2010. № 26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-kratkosrochnogo-prognozirovaniya-pozharnoy-opasnosti-v-lesah-po-usloviyam-pogody> (data obrashcheniya: 22.09.2022).
9. GOST R 22.1.09-99. Bezopasnost' v chrezvychajnyh situacijah. Monitoring i prognozirovanie lesnyh pozharov. M., 1999. 11 s.
10. Mohov I. I. i dr. Blokingi v Severnom polusharii i Evroatlanticheskom regione: ocenki izmenenij po dannym reanaliza i model'nym raschetam // Doklady Akademii nauk. 2013. T. 449. № 5. S. 1–5.
11. Dzerdzeevskij B. L. Cirkulyacionnye mekhanizmy v atmosfere severnogo polushariya v XX stoletii. M., 1968. 240 s.

12. Mohov I. I. Atmosfernye blokingi i svyazannye s nimi klimaticheskie anomalii. Nelinejnye volny. 2016. URL: <https://docplayer.com/35005034-Atmosfernye-blokingi-i-svyazannye-s-nimi-klimaticheskie-anomalii.html> (data obrashcheniya: 22.09.2022).
13. Holopcev A. V., Batrakov G. F. Vtorzheniya arkticheskogo vozduha i obmen mezhdou troposferoj i nizhnej stratosferoj // Processy v geosredah. 2021. № 2 (28). S. 1155–1160.
14. Hromov S. P., Petrosyanc M. A. Meteorologiya i klimatologiya. M., 2012. 584 s.
15. Mohov I. I. Ekstremal'nye atmosfernye i gidrologicheskie yavleniya v rossijskih regionah: svyaz' s Tihookeanskoj dekadnoj oscillyaciej // Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle. 2021. T. 500. № 2. S. 183–188.
16. Zolotokrylin A. N. i dr. Sravnitel'nye issledovaniya zasuh 2010 i 2012 g. na Evropejskoj territorii Rossii po meteorologicheskim i MODIS dannym // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. T. 10. № 1. S. 246–253.
17. Baza dannyh «Koordinaty termicheskikh toчек». URL: <https://www.mchs.gov.ru/ministerstvo/otkrytoe-ministerstvo/otkrytie-dannye/7707034952-ThermoPoints> (data obrashcheniya: 22.09.2022).
18. Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production // ECMWF Newsletter. 2016. Vol. 147. P. 7.
19. IMERG: Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM | NASA. URL: <https://gpm.nasa.gov/data/imerg> (data obrashcheniya: 22.09.2022).

УДК 614.847.9

liopiy@yandex.ru

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ
ОСВЕЩЕННОСТИ ПОЖАРНЫХ ФОНАРЕЙ В УСЛОВИЯХ
СНИЖЕНИЯ ВИДИМОСТИ В ДЫМУ**

**AN EXPERIMENTAL METHOD FOR DETERMINING THE ILLUMINATION
LEVEL OF FIRELIGHTS IN CONDITIONS OF REDUCED
VISIBILITY IN SMOKE**

*Бессонов Д. В.,
Екатеринбург
Девяткин Н. О., Понукалин А. Ю.,
Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург
Криворогова А. С.,
ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Свердловской области, Екатеринбург*

*Bessonov D.,
Yekaterinburg
Devyatkin N., Ponukalin A.,
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Yekaterinburg
Krivorogova A.,
Fire Testing Laboratory in the Sverdlovsk region,
Yekaterinburg*

В статье освещен вопрос формирования такого опасного фактора пожара, как снижение видимости в дыму, а также его воздействия на человека. Рассмотрено влияние задымления на участников тушения пожара. Проведен анализ требований нормативных документов о необходимости комплектования газодымозащитников пожарными фонарями. Приведено сравнение характеристик пожарных фонарей групповых, находящихся на вооружении в гарнизоне пожарной охраны Свердловской области, а также представлено соотнесение характеристик с требованиями нормативных документов, предъявляемыми к пожарной продукции. Впервые предлагается экспериментальная установка определения уровня освещенности пожарных фонарей в условиях снижения видимости в дыму с ее описанием и принципиальной схемой. Поставлен и описан эксперимент на предлагаемой установке по сравнению уровня освещенности различных образцов пожарной продукции (пожарных фонарей) в темном помещении и условиях снижения видимости в дыму. Результаты проведенного эксперимента опубликованы и проанализированы в данной статье.

Ключевые слова: снижение видимости в дыму, пожарный фонарь, уровень освещенности, газодымозащитник, пожарная охрана, испытание, эксперимент.

The article highlights the issue of the formation of such a dangerous fire factor as reduced visibility in smoke, as well as its impact on humans. The influence of smoke on the participants of fire extinguishing is considered. The analysis of the requirements of regulatory documents on the need to equip gas and smoke protectors with fire lanterns is carried out. A comparison of the characteristics of group fire lanterns in service in the garrison of the fire department of the Sverdlovsk region is given, and also a correlation of the

characteristics with the requirements of regulatory documents for fire products is presented. For the first time, an experimental installation for determining the illumination level of fire lanterns in conditions of reduced visibility in smoke with its description and schematic diagram is proposed. An experiment has been set up and described on the proposed installation to compare the illumination level of various samples of fire products (fire lanterns) in a dark room and conditions of reduced visibility in smoke. The results of the experiment are published and analyzed in this article.

Keywords: reduced visibility in smoke, fire lantern, light level, smoke protection, fire department, test, experiment

В большинстве случаев одним из первых опасных факторов пожара (ОФП), достигающим своих пороговых значений, является критическая продолжительность пожара по потере видимости, которая и определяет время блокирования эвакуационных выходов. Дым, являющийся следствием любого возгорания, уменьшает видимость, а это в свою очередь препятствует эвакуации. Видимость зависит от концентрации (оптической плотности) дыма и таких факторов, как уровень контраста с фоном и человеческое восприятие.

Дым состоит из компонентов, которые можно объединить в три группы:

- горячие испарения и газы, выделяющиеся при горении материала;
- несгоревшие продукты разложения и сконденсированные материалы (цвет этих продуктов может меняться от светлого до черного, как сажа);
- часть нагретого воздуха, попавшего внутрь поднимающегося облака.

Таким образом, дым – это высокодисперсный аэрозоль с мельчайшими частицами твердого тела или капель жидкости, находящихся во взвешенном состоянии в газовой среде (обычно в воздухе).

Снижение видимости в дыму можно объяснить с физической точки зрения процессом рассеяния света, который заключается в следующем: свет, являющийся электромагнитной волной, проходя через материальную среду (частички дыма), возбуждает колебания электронов в атомах. В результате колебаний электроны излучают вторичные волны. Если среда является однородной, то, вследствие интерференции

вторичных волн, интенсивность проходящего света будет отлична от нуля лишь в направлении падающей световой волны, рассеяние не наблюдается. Если же в среде имеются мелкие неоднородности, то дифракция волн на неоднородностях приводит к значительному рассеянию света. В то же время электроны, совершающие колебания под действием электрического поля световой волны, часть своей энергии передают атомам среды. При этом среда нагревается, а энергия световых волн уменьшается. Такой процесс называют поглощением света. За счет рассеяния и поглощения энергия падающей световой волны по мере прохождения ее через вещество убывает, вследствие чего происходит снижение видимости в дыму.

Задымленность не имеет существенного вредного прямого воздействия на организм человека, однако дезориентация в пространстве, создаваемая данным опасным фактором на месте пожара, может повлечь за собой травмирование или даже летальный исход для человека [1-2].

Снижение видимости при пожаре приводит к увеличению времени разведки, проводимой звеньями газодымозащитной службы. От того как газодымозащитники проведут разведку места пожара в условиях задымленности зависит скорейшее спасение людей и имущества, создание безопасных условий для работы личного состава на месте пожара, выбор решающего направления, успешное выполнение боевой задачи.

По данным исследований, приведенных в [3], при снижении видимости до

трех метров скорость движения звеньев ГДЗС уменьшается на 25 %.

Для повышения эффективной работы звеньев ГДЗС в условиях задымленности подразделения пожарной охраны используют технические средства освещения (пожарные фонари). Так в соответствии с п. 29 [4], п. 73, п. 121, п. 125 [5], табл. 1, 2

[6] наличие средств освещения (фонарей пожарных) является обязательным для участников тушения пожара.

На примере гарнизона пожарной охраны Свердловской области можно сравнить средства освещения, состоящие на вооружении. Сравнительные характеристики пожарных фонарей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики пожарных фонарей, стоящих на вооружении гарнизона пожарной охраны Свердловской области

	ФОС 3-5/6	ФОС-С	ЭРА Альфа РА-603	Диггер-4
Номинальное напряжение аккумулятора, В	6	6	3,7	3,7
Номинальная ёмкость аккумулятора, А/ч	6	6	3	2,2
Освещенность (на расстоянии 3 м) не менее, лк	1500	2000	1500	2000 (1 м)
Угол светового излучения, град	4,5	8	–	–
Дальность светового луча, м	300	50	130	100
Время непрерывной работы не менее, час	5	12	4	8
Время заряда аккумулятора не более, час	8	8	–	8
Среднее время безотказной работы источника света, час	100	50000	50000	50000
Масса снаряжённого фонаря, кг	1,6	1,6	1,05	0,62
Габаритные размеры, мм длина×высота×диаметр	320×160×125		248×160×178	211×75×195
Автоматический контроль заряда аккумулятора	Есть (время заряда не нормировано)		Есть	Есть
Индикатор уровня заряда аккумулятора	Есть		Есть	Есть

На основе анализа значений параметров из [7–10] и сопоставления с требованием табл. 1 [11] можно сделать вывод, что используемые фонари соответствуют общим техническим требованиям, предъявляемым к пожарным фонарям по указанным параметрам.

Однако, на наш взгляд, совокупность требований, указанных в [11], не представляют сведений об эффективном использовании испытываемых пожарных фонарей в условиях снижения видимости в дыму. В связи с чем предлагается методика испытания пожарных фонарей с помощью

разработанной и опробованной авторами статьи экспериментальной установки.

Для замера параметра ослабления освещенности поверхности в имитированном дыму была изготовлена установка (рис. 1) из металлического контейнера размерами 3300×2000×2200 мм с толщиной стенок 1,5–2,0 мм, без оконных проемов и плотно закрывающейся дверцей устанавливается и закрепляется на уровне 1500 мм от уровня пола фотометрическая головка люксметра (1). Имитация дыма осуществляется посредством генератора дыма Involight FM1500 (2). Уровень задымления

внутри контейнера измеряется при помощи фотометрической системы, состоящей из источника (гелий-неоновый лазер мощностью 2,5 мВт) (3) и приемника света (фотодиод) (4), расположенных параллельно друг другу на противоположных стенках внутри контейнера. На подготовленной подставке на уровне 1500 мм от

уровня пола устанавливается испытуемый включенный фонарь (5). Измеритель люксметра (6) и регистрирующий прибор фотометрической системы (7) находятся снаружи контейнера, линии связи приборов проложены через специальные герметичные отверстия. (рис. 1). Условия окружающей среды при проведении эксперимента указаны в табл. 2.

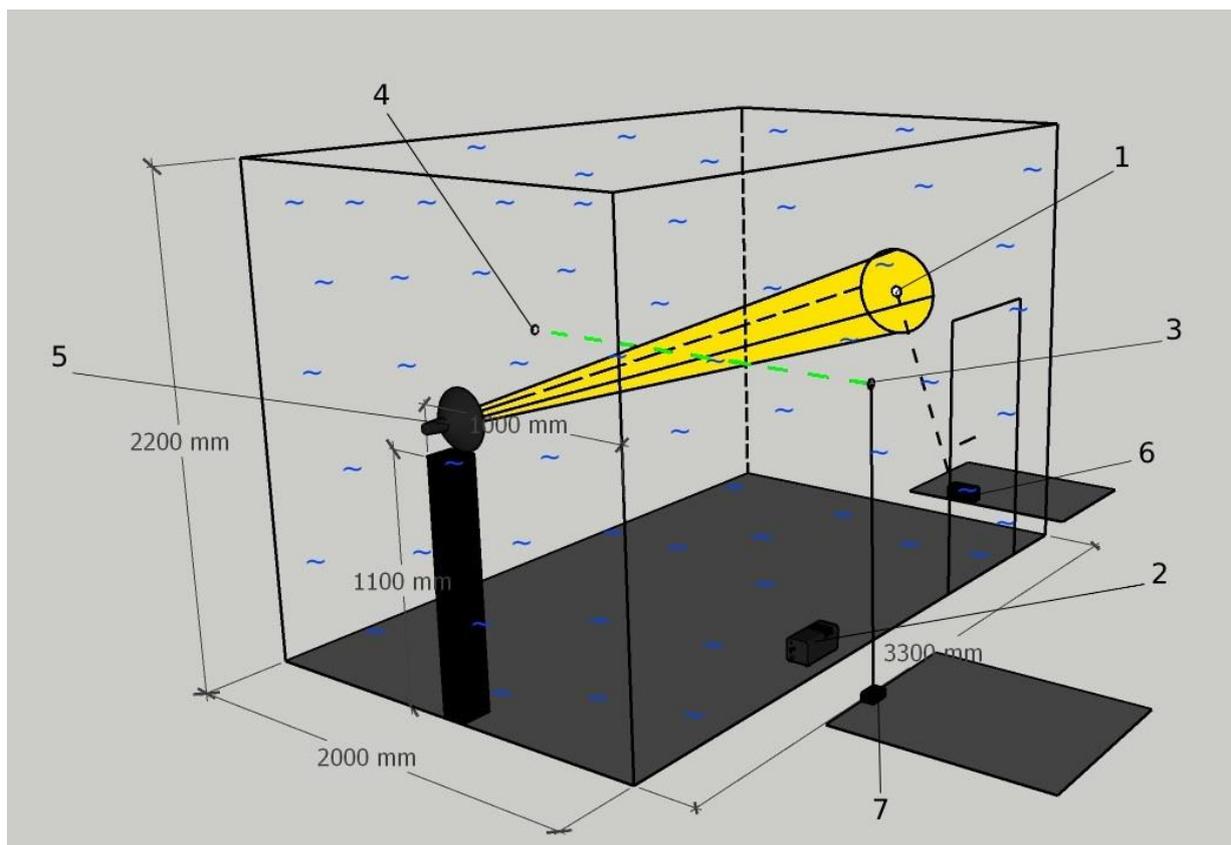


Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для определения уровня освещенности пожарных фонарей в условиях снижения видимости в дыму

Таблица 2
Условия при проведении эксперимента

Температура, °С	Атмосферное давление, кПа	Относительная влажность, %
22,5	99,4	75,3

Для проведения экспериментального исследования были выбраны четыре образца пожарных фонарей групповых, состоящих на вооружении в пожарно-спасательных частях Свердловского области: ФОС 3-5/6, ФОС-С, ЭРА Альфа РА-603,

Диггер-4. Каждый фонарь имеет различную проекцию создаваемого светового луча на поверхность и спектрофотометрическую температуру.

Порядок проведения испытания*:

1. Включить источник и приемник света фотометрической системы. Установить начальное значение светопропускания, фиксируемое регистрирующим прибором фотометрической системы «Термодат-13КХ3» – 500 единиц.

2. Включенный испытуемый образец (фонарь)** поместить в испытательную камеру на подставку так, чтобы луч света падал на фотометрическую головку люксметра Ю-116.

3. Провести три замера уровня освещенности, создаваемого исследуемым образцом.

4. Выключить испытуемый образец (фонарь).

5. Включить генератор дыма Involight FM1500, дождаться достижения

значения 0 ед. светопропускания, фиксируемого регистрирующим прибором фотометрической системы

6. Включить испытуемый образец (фонарь), провести три замера уровня освещенности, создаваемого исследуемым образцом.

*Все замеры должны проводиться при закрытой дверце.

**Для чистоты эксперимента аккумуляторы всех образцов должны быть заряжены полностью.

Результаты эксперимента представлены в табл. 3. По результатам замеров уровня освещенности был получен средний показатель. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Таблица 3

Результаты проведенного эксперимента

	№ за- мера	ФОС 3-5/6	ФОС-С	ЭРА Альфа РА-603	Диггер-4
Освещенность (на расстоянии 3 м), лк	1	1505,0	2105,0	1510,0	1045,0
	2	1532,0	2010,0	1530,0	1030,0
	3	1510,0	2030,0	1550,0	980,0
	средний показа- тель	1515,7	2048,3	1530,0	1018,3,0
Освещенность в условиях искусственного задымления (на расстоянии 3 м), лк	1	72,8	105,1	61,3	23,8
	2	70,1	100,3	64,2	25,1
	3	68,2	101,2	65,3	24,7
	средний показа- тель	70,4	102,2	63,6	24,5

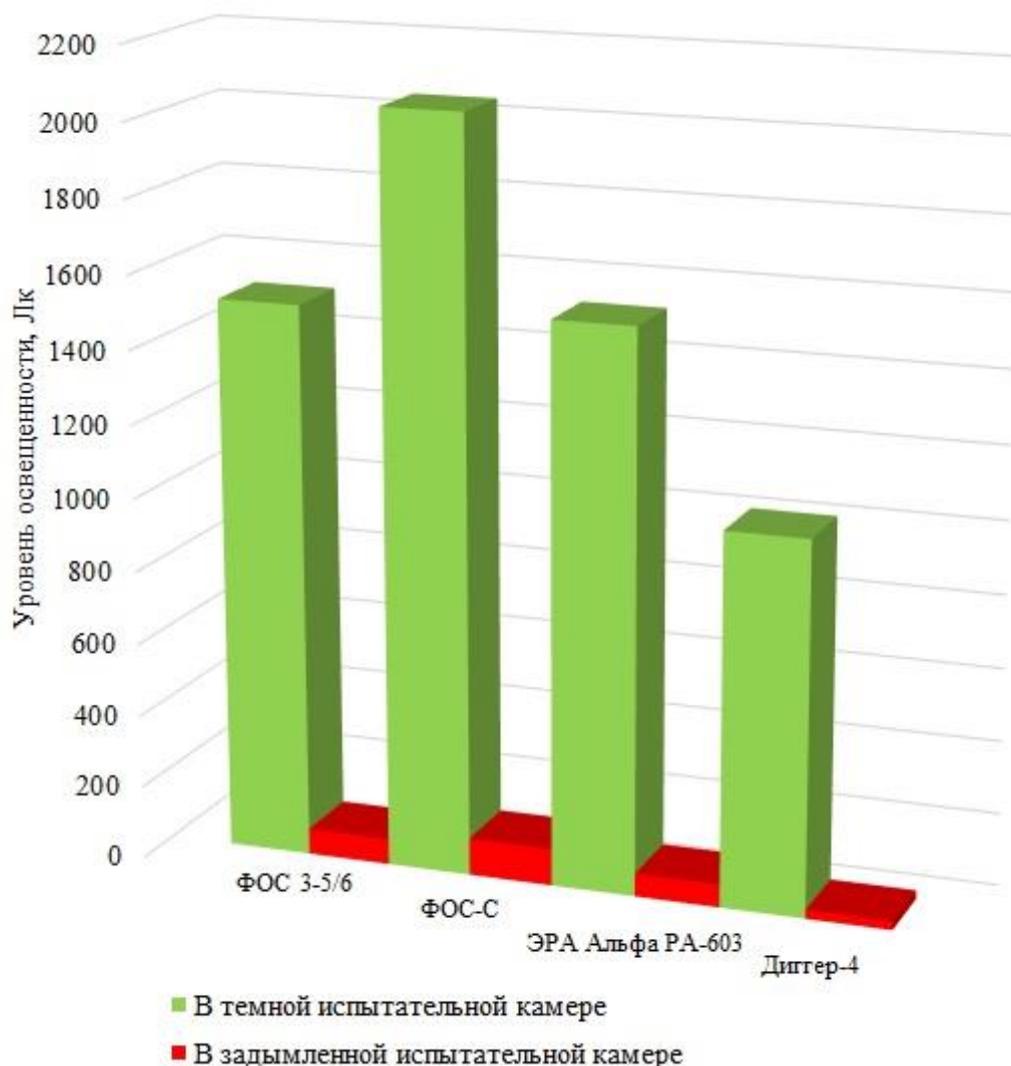


Рисунок 2. Сравнение уровня освещенности, создаваемого исследуемыми образцами в темной и задымленной испытательной камере установки

Анализируя данные, полученные в ходе испытаний различных моделей фонарей, используемых газодымозащитными службами, видно, что исследуемые образцы имеют различные показатели освещенности как в условиях недостаточной видимости (темноты), так и в условиях задымленности. Данные показатели являются значимыми для оценки эффективности при работе с пожарными фонарями в условиях реального пожара. Основным критерием для возможности применения

фонарей в дыму является визуальное восприятие объектов в задымленной зоне. Как показал проведенный эксперимент, чем выше показатель освещенности, тем лучше визуальное восприятие объектов. Дальнейшее проведение экспериментальных исследований на данной установке позволит предложить обоснованные количественные критерии и доработанную методику по оценке уровня освещенности в дыму для пригодности использования фонарей на пожаре.

Литература

1. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М., 1951. 288 с.

2. Серебренников Д. С., Литвинцев К. Ю. Обзор моделей распространения дыма и определения дальности видимости // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности. 2011. № 1 (35). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-1/06-01-11.ttb.pdf> (дата обращения: 19.08.2022).
3. Чистяков И. М. и др. Влияние снижения видимости на пожаре на работу звеньев ГДЗС // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2016. Т. 1. № 1 (7). С. 346–347.
4. Приказ МЧС РФ от 9.01.2013 № 3 «Об утверждении Правил проведения личным составом федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы аварийно-спасательных работ при тушении пожаров с использованием средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения в непригодной для дыхания среде».
5. Приказ МЧС России от 16.10.2017 № 444 «Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ» (с изм. и доп.).
6. Приказ МЧС России от 25.07.2006 № 425 «Об утверждении норм табельной положенности пожарно-технического вооружения и аварийно-спасательного оборудования для основных и специальных пожарных автомобилей, изготавливаемых с 2006 года».
7. Фонарь осветительный специальный. Паспорт и руководство по эксплуатации. URL: <https://alfapolus.by/wp-content/uploads/2016/03/pasport-izdeliya-fonar-fos.pdf> (дата обращения: 19.08.2022).
8. Фонари осветительные специальные. Паспорт и руководство по эксплуатации. URL: https://azimut-b.ru/wp-content/uploads/2021/05/pasport_fos-1.pdf (дата обращения: 19.08.2022).
9. Фонарь бытовой светодиодный. Руководство по эксплуатации (паспорт). URL: <http://era74.ru/media/docs/2022/04/15/pasport-era-ra-603-alfa.pdf> (дата обращения: 19.08.2022).
10. Диггер-4, БЛИК. Профессиональный аккумуляторный фонарь общепромышленного назначения. URL: <https://blik.nt-rt.ru/images/manuals/digger4.pdf> (дата обращения: 19.08.2022).
11. ГОСТ Р 53270–2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Техника пожарная. Фонари пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний. М., 2019.

References

1. Shifrin K. S. Rasseyanie sveta v mutnoj srede. M., 1951. 288 s.
2. Serebrennikov D. S., Litvincev K. YU. Obzor modelej rasprostraneniya dyma i opredeleniya dal'nosti vidimosti // Internet-zhurnal «Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2011. № 1 (35). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-1/06-01-11.ttb.pdf> (data obrashcheniya: 19.08.2022).
3. Chistyakov I. M. i dr. Vliyanie snizheniya vidimosti na pozhare na rabotu zven'ev GDZS // Pozharnaya bez-opasnost': problemy i perspektivy. 2016. T. 1. № 1 (7). S. 346–347.
4. Prikaz MCHS RF ot 9.01.2013 № 3 «Ob utverzhdenii Pravil provedeniya lichnym sostavom federal'noj protivopozharnoj sluzhby Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby avarijno-spasatel'nyh rabot pri tushenii pozharov s ispol'zovaniem sredstv individual'noj zashchity organov dyhaniya i zreniya v neprigodnoj dlya dyhaniya srede».
5. Prikaz MCHS Rossii ot 16.10.2017 № 444 «Ob utverzhdenii Boevogo ustava podrazdelenij pozharnoj ohrany, opredelyayushchego poryadok organizacii tusheniya pozharov i provedeniya avarijno-spasatel'nyh rabot» (s izm. i dop.).
6. Prikaz MCHS Rossii ot 25.07.2006 № 425 «Ob utverzhdenii norm tabel'noj polozhennosti pozharno-tekhnicheskogo vooruzheniya i avarijno-spasatel'nogo oborudovaniya dlya osnovnyh i special'nyh pozharnyh avtomobilej, izgotavlivaemyh s 2006 goda».
7. Fonar' osvetitel'nyj special'nyj. Pasport i rukovodstvo po ekspluatcii. URL: <https://alfapolus.by/wp-content/uploads/2016/03/pasport-izdeliya-fonar-fos.pdf> (data obrashcheniya: 19.08.2022).
8. Fonari osvetitel'nye special'nye. Pasport i rukovodstvo po ekspluatcii. URL: https://azimut-b.ru/wp-content/uploads/2021/05/pasport_fos-1.pdf (data obrashcheniya: 19.08.2022).
9. Fonar' bytovoj svetodiodnyj. Rukovodstvo po ekspluatcii (pasport). URL: <http://era74.ru/media/docs/2022/04/15/pasport-era-ra-603-alfa.pdf> (data obrashcheniya: 19.08.2022).
10. Digger-4, BLIK. Professional'nyj akkumulyatornyj fonar' obshchepromyshlennogo naznacheniya. URL: <https://blik.nt-rt.ru/images/manuals/digger4.pdf> (data obrashcheniya: 19.08.2022).
11. GOST R 53270–2009. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Tekhnika pozharnaya. Fonari pozharnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy. M., 2019.

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДА
ПРИ ДЕСТРУКТИВНОМ СОБЫТИИ НА НЕФТЕПРОВОДЕ****ASSESSMENT OF THE DEGREE OF THE HAZARD
OF HYDROCARBON BURNING DURING A DESTRUCTIVE
EVENT ON THE OIL PIPELINE**

*Королев Д. С., кандидат технических наук,
Воронежский государственный технический университет, Воронеж*

*Korolev D.,
Voronezh state technical university, Voronezh*

В рамках санкционной политики, проводимой странами Европейского союза, США и другими против Российской Федерации, возникла необходимость срочной диверсификации нефтяных потоков в страны Азии. Однако транспортирование кислородсодержащих углеводородов – сложный, взрывоопасный технологический процесс. В работе рассматривается ситуация, когда в сети нефтепровода возникает гидроудар, что провоцирует быстрое распространение углеводородов. Вследствие чего проводится анализ пожарной опасности, разрабатывается дерево событий и предлагаются пробит-функции по определению негативного воздействия на людей. Установлено, что реализация наиболее опасного сценария может унести человеческие жизни, при этом вероятность реализации такого события составляет 0,0000006. Столь низкий показатель характеризует не степень опасности ситуации, а малую вероятность возникновения взрыва при разливе нефти. Однако ситуация кардинально изменится, если в качестве транспортируемого вещества будет выступать взрывоопасный состав.

Ключевые слова: пожарная безопасность, технологический процесс, нефтепродукты, транспортирование, вероятность.

As part of the sanctions policy pursued by the countries of the European union, the United States of America and others against the Russian Federation, there was an urgent need to diversify oil flows to Asian countries. However, the process of transporting oxygen-containing carbohydrates is a complex, explosive technological process. The paper considers a situation when a water hammer occurs in the oil pipeline network, which contributes to the rapid spread of hydrocarbons. As a result, a fire hazard analysis is carried out, an event tree is developed and probit functions are proposed to determine the negative impact on people. It is established that the implementation of the most dangerous scenario will be able to take away human life, while the probability of such an event will be 0.0000006. Such a low indicator characterizes not the degree of danger of the situation, but the low probability of an explosion during an oil spill. However, the situation will change dramatically if an explosive composition acts as the transported substance.

Keywords: fire safety, technological process, oil products, transportation, probability.

В ресурсно-сырьевой и крупным производителем, потребителем и технологической базе мировой энергетики экспортером кислородсодержащих Российская Федерация занимает углеводородов. При этом основной целью уникальное место, являясь одновременно развития отрасли является максимальное

содействие социально-экономическому становлению страны, а также укреплению и сохранению позиций на мировой арене [1].

Согласно статистическим данным, представленным на рис. 1 добыча нефти и газового конденсата в общем эквиваленте выросла на 14 % в сравнении с ранними периодами, что обусловлено широкомасштабным освоением месторождений в Восточной Сибири,

Республике Саха и Каспийского моря. В настоящее время на полную мощность вышел нефтеналивной терминал «Ворота Арктики», на который сырье поступает с Приразломного месторождения, расположенного на арктическом континентальном шельфе. Таким образом, достигнутый уровень добычи существенно превышает внутренние потребности страны [2].

Динамика изменения добычи нефти на территории РФ

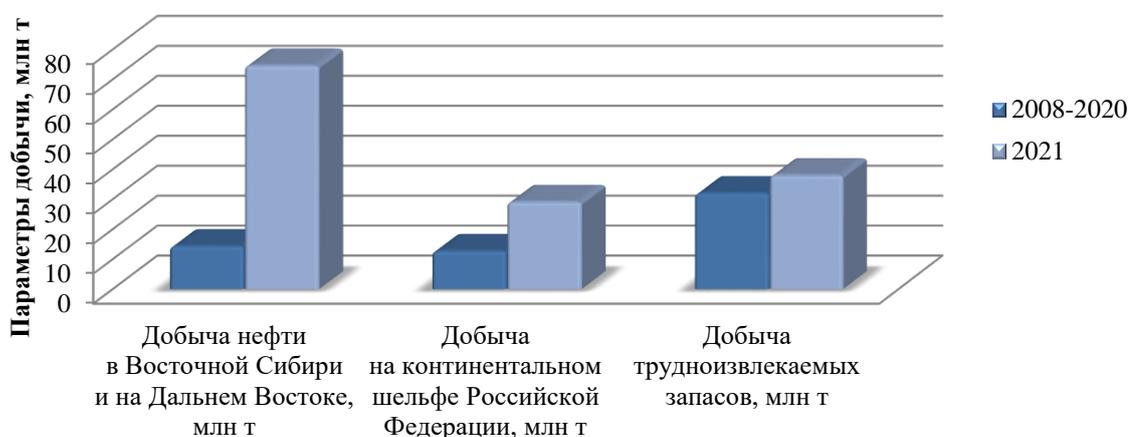


Рисунок 1. Добыча нефти и газового конденсата на территории РФ

Не менее важным моментом является модернизация нефтеперерабатывающих заводов, при которой введены в строй 83 современные установки вторичной переработки нефти, увеличившие объем перерабатываемого сырья на 22,9 %, глубину переработки – на 10,1 %, выход светлых нефтепродуктов – на 5,4 %, а также завершены работы по развитию систем магистральных трубопроводов [1, 3]:

– введена в эксплуатацию нефтепроводная система «Восточная Сибирь – Тихий океан» до порта Козьмино, «Сковородино – Мохэ – Дацин», Балтийская система;

– построены нефтепроводные системы «Пурпе – Самотлор», «Заполярье – Пурпе», «Куюмба – Тайшет»;

– модернизированы нефтепроводы для увеличения поставок в порты Приморск и Новороссийск.

Поэтому необходимость разработки мероприятий и комплекса современных технических решений, предупреждающих и исключающих опасные факторы пожара, непосредственно влияющие на состояние защищенности: нефтебаз, складов с горюче-смазочными материалами, систем трубопроводов – является неотъемлемым условием эксплуатации взрывопожароопасных объектов. Причем это становится особенно важным в условиях [4, 5]:

– использования высокопроизводительного оборудования, выполняющего несколько

технологических процессов в одной установке;

- совершенствования технологических процессов;
- увеличения мощности единичных производственных агрегатов;
- увеличения количества взрывоопасных веществ.

Таким образом, сознательное повышение пожарной опасности технологических процессов требует проведения качественной оценки действующей системы обеспечения пожарной безопасности, прогнозирования аварийных ситуаций с целью снижения количества возгораний и материального ущерба.

Анализ пожарной опасности возникновения и развития деструктивных событий на объектах нефтегазовой отрасли позволил установить, что их предшественниками являются: повреждение технологической системы, нарушение режима работы, некорректное выполнение работ по очистке и промывке оборудования, потеря герметичности фланцевых соединений и запорной арматуры, воздействие атмосферного электричества, коррозия и эрозия, температурная деформация, брак, усталость металла. В связи с чем были предложены возможные сценарии развития аварийных ситуаций на взрывоопасных объектах (рис. 2) [6, 7].

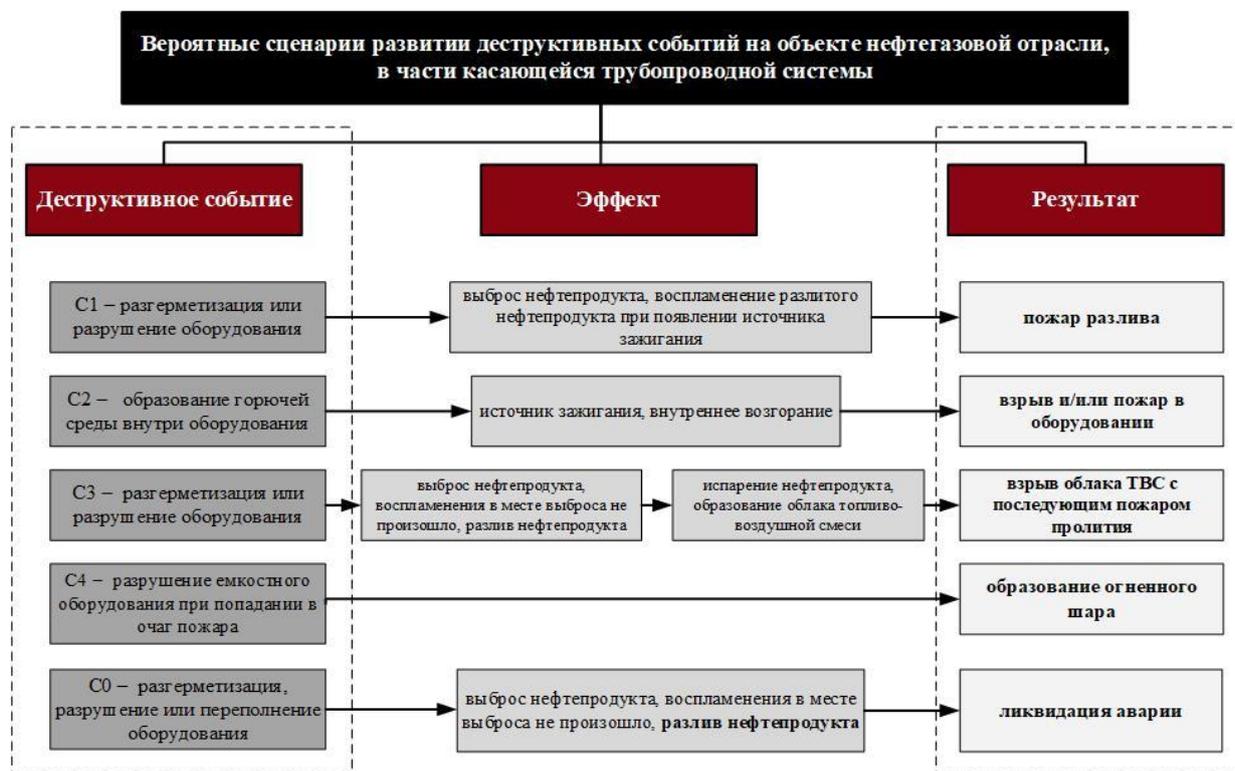


Рисунок 2. Вероятные сценарии развития аварийных ситуаций в системе нефтепроводов

Любой взрывоопасный сценарий начинается с инициирующего события, например, в результате утечки различной интенсивности в связи с отказом оборудования или гидравлическим ударом. Рассмотрим ситуацию, когда в системе трубопроводов третьего класса, что работают

под давлением или высокой температурой, произошел гидроудар при закрытии задвижки. В этом случае определим прочность стального нефтепровода $d = 400$ мм и с толщиной стенки 5 мм, скорость протекания сырья – 1,2 м/с, объемный вес – 860 кг/м³.

При определении приращения давления в нефтепроводе воспользуемся формулой Н. Е. Жуковского (1) [8], а для расчета скорости распространения ударной волны – формулой (2):

$$\Delta P = \rho \cdot v \cdot \Delta W, \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{E_{жс}}{\rho \cdot \left(1 + \frac{d \cdot E_{жс}}{\sigma \cdot E}\right)}}, \quad (2)$$

где, ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$$v = \sqrt{\frac{1,3 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{730 \cdot \left(1 + \frac{0,390 \cdot 1,3 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{0,005 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 10^4}\right)}} = 552 \text{ м/с}$$

$$\Delta P = 730 \cdot 552 \cdot (1,2 - 0) = 484209 \text{ Па} = 0,484 \text{ МПа}$$

Приращение давления составит 0,484 МПа, что выше допустимой нормы. В этом случае возможно повреждение трубопровода и истечение нефти, тогда площадь разлива нефти (зависит от ряда факторов: плотность, вязкость, климатические условия и ландшафта) можно рассчитать по формуле (3):

$$S = Q_{сумм} \cdot K_{эмп} \quad (3)$$

$$S = 5576 \cdot 0,5 = 2788 \text{ м}^2$$

где, $Q_{сумм}$ – суммарный объем нефтепродуктов, высвободившихся из оборудования при разгерметизации;

$K_{эмп}$ – эмпирический коэффициент.

Тогда количество высвободившихся наружу нефтепродуктов после прекращения подачи определим по формуле (4), а до остановки прокачки – по формуле (5):

$$Q_{ст} = \Pi \cdot R^2 \cdot L \quad (4)$$

$$Q_{ст} = 3,14 \cdot 0,4 \cdot 1000 = 1256 \text{ л}$$

где R – внутренний радиус поврежденного нефтепровода;

L – длина участка от места аварии до предохранительных задвижек (1000 м);

v – скорость распространения ударной волны м/с;

ΔW – уменьшение скорости движения при торможении струи м/с;

d – внутренний диаметр трубопровода, м;

σ – толщина стенки трубы, мм;

$E_{жс}$ – модуль упругости жидкости,

Па;

E – модуль упругости материала трубопровода, Па.

$$Q_T = Q_0 \cdot T_A \quad (5)$$

$$Q_T = 1,2 \cdot 3600 = 4320 \text{ л}$$

где, Q_0 – максимальный расход нефтепродукта в нефтепроводе при нормальном режиме работы;

T_A – время прекращения прокачки нефтепродукта (3600 с).

Находим суммарный объем разлившихся нефтепродуктов в окружающую среду по формуле (6):

$$Q_{сумм} = Q_T + Q_{ст} \quad (6)$$

$$Q_{сумм} = 4320 + 1256 = 5576 \text{ л}$$

Q_T – объем продуктов нефти, попавших в атмосферу до остановки прокачки;

$Q_{ст}$ – объем продуктов нефти, попавших в атмосферу после остановки прокачки.

Таким образом, максимальная площадь разлива нефти превысит 2,5 км² (при заданных условиях), а наглядная детализация зон разлива представлена на рис. 3.

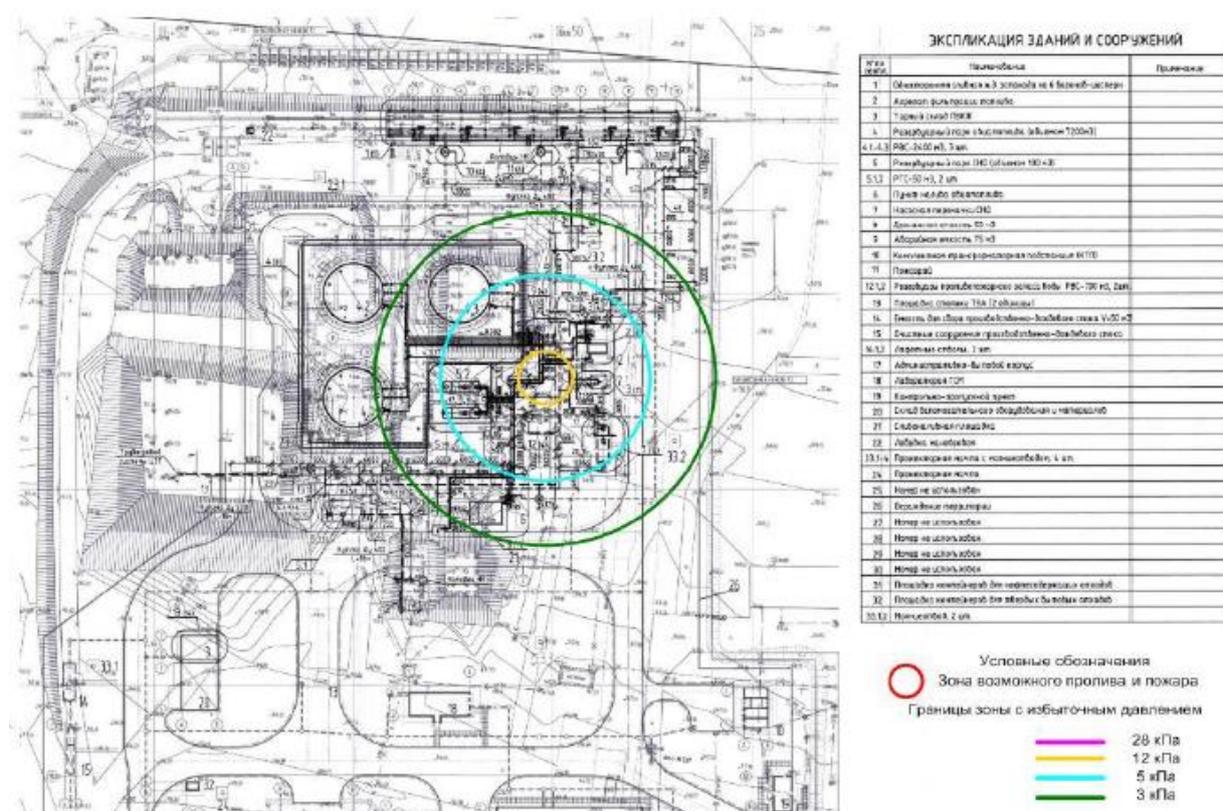


Рисунок 3. Границы зон потенциального разлива при разных сценариях

Проведем оценку возможного числа пострадавших среди рабочего персонала в результате воздействия на них: максимального избыточного давления, ударной волны, теплового излучения пожара разлива, паров нефтепродукта, основываясь на вероятностных сценариях развития аварийных ситуаций в системе нефтепроводов.

Отметим, что одна и та же мера негативного воздействия (количество вдыхаемых паров, доза термической радиации или импульс давления) оказывает последствия различной степени тяжести для различного рода людей, т.е. деструктивный эффект носит вероятностный характер и выражается формулой (7), которая показывает связь между вероятностью поражения и поглощенной дозой отравляющего вещества [9].

$$P_{пор} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{Pr-5} \exp(-\frac{t^2}{2}) dt \quad (7)$$

Pr – пробит-функция представляет собой верхний интегральный предел и может быть определена по формуле (8):

$$Pr = a + b \cdot \ln D, \quad (8)$$

где a, b – константы для каждого из веществ (процесса), характеризующие его особенности и меру опасности его воздействия;

D – доза негативного воздействия, поглощенная человеком.

Для оценки числа пострадавших на открытой местности, в административных зданиях от взрывной волны, термического воздействия принимались значения, представленные в табл. 1, табл. 2 и табл. 3 соответственно [10, 11].

Таблица 1
 Параметры последствий на открытой местности

Максимальное избыточное давление, кПа	Степень поражения от взрывной волны
20	Разрывы барабанных перепонок. Небольшие кровоизлияния в легкие (условно – поражение 1 степени)
50	Общее сотрясение организма. Кровоизлияния в легкие, межмышечное кровоизлияние (условно – поражение 2 степени)
70	Состояние контузии (условно – поражение 3 степени)
100–150	Переломы ребер, гиперемия сосудов мягкой мозговой оболочки
300	Летальный исход

Таблица 2
 Степень поражения в административных зданиях

Максимальное избыточное давление, кПа	Степень поражения от взрывной волны
100	Полное разрушение зданий
53	50 %-е разрушение зданий
28	Средние повреждения зданий
12	Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей и т. п.)
5	Нижний порог повреждения человека волной давления
3	Малые повреждения (разбита часть остекления)

Таблица 3.
 Степень поражения от термического воздействия

Интенсивность излучения, кВт/м ²	Степень поражения
1,4	Без негативных последствий в течение неограниченного времени
4,2	Безопасно для человека в брезентовой одежде
7,0	Непереносимая боль через 20 – 30 с. Ожог 1 степени через 15 – 20 с. Ожог 2 степени через 30 – 40 с.
10,5	Непереносимая боль через 3 – 5 с. Ожог 1 степени через 6 – 8 с. Ожог 2 степени через 12 – 16 с.
44,5	Летальный исход с вероятностью 50 % при длительном воздействии около 10 с

Для определения вероятности негативного воздействия на людей необходимо использовать пробит-функции:

– Прямое воздействие на людей избыточного давления на местности:

$$Pr = 5 - 5,74 \cdot \ln\left(\frac{4,2 \cdot 10^5}{P} + \frac{1,3 \cdot 317,8 \cdot 4,121}{I}\right),$$

– Для случая полного разрушения зданий при взрыве:

$$Pr = 5 - 0,22 \cdot \ln\left(\frac{40000}{P}\right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I}\right)^{11,3},$$

– Для случая сильного повреждения стен промышленных зданий, при которых возможно исключить полный снос здания:

$$Pr = 5 - 0,26 \cdot \ln\left(\frac{175000}{P}\right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I}\right)^{9,3},$$

– Вероятности разрыва барабанных перепонок имеет вид:

$$Pr = -12,6 + 1,524 \cdot \ln(P),$$

– Вероятность отброса людей ударной волной:

$$Pr = 5 - 2,44 \ln\left(\frac{7380}{P} + \frac{1300}{I}\right)$$

– Вероятность смертельного поражения при термическом воздействии определяется:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t),$$

– Вероятность ожога первой степени:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t),$$

где P – величина максимального избыточного давления, кПа (поражение людей может наступить в случае механического воздействия за счет разрушения зданий при давлении 30 – 50 кПа);

I – импульс давления волны, Па·с;

q – действующий на человека тепловой поток, кВт/м²;

τ – длительность воздействия, с;

t – время нахождения человека во взрывоопасной зоне, с, определяется по формуле (9):

$$t = t_0 + \frac{X}{V} \quad (9)$$

где t_0 – характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает дальнейшее решение;

X – расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (где плотность теплового потока менее 4 кВт/м²);

V – скорость движения человека (принята равной 5 м/с).

Результаты расчетов интенсивности и зон поражающих факторов каждого сценария, представленного на рис. 2, использовались для оценки потенциального числа пострадавших путем определения произведения плотности распределения рабочего персонала на площадь зоны поражающего фактора.

Плотность распределения рабочего персонала определялась следующим образом:

– принималось допущение, что люди равномерно распределены на территории объекта защиты;

– существовало исключение некоторых мест, где согласно технологическому процессу четко определено количество людей;

– при этом общее число людей на объекте защиты принято 29 человек;

– наибольшая работающая смена – 14 человек;

– режим работы – круглосуточный.

Использование пробит-функций по каждому вероятному неблагоприятному сценарию развития событий в результате возникновения нештатной ситуации (гидроудар в технологическом нефтепроводе) определили максимальное количество погибших и раненых среди рабочего персонала (табл. 5).

Таблица 5
Вероятное количество погибших и раненых среди рабочих объекта защиты

Технологический нефтепровод	Сценарий	$P_{\text{усл.}}$, ЧС/год	Кол-во погиб- ших	$P_{\text{усл.}}$	Вероят- ность гибели, 1/год	Кол-во раненых	Услов., $P_{\text{ранения}}$	Услов. $P_{\text{ранения}}$, 1/год
	C1	$2,4 \cdot 10^7$	0	–	–	0	0,6	$4,80 \cdot 10^{-8}$
	C3	$3,1 \cdot 10^{-6}$	0	–	–	0	0,6	$6,20 \cdot 10^{-7}$
	C2	$3,4 \cdot 10^{-7}$	0	–	–	1	0,2	$6,80 \cdot 10^{-8}$
	C0, C4	$6,4 \cdot 10^{-6}$	0	–	–	1	0,15	$6,00 \cdot 10^{-7}$

По результатам расчетов было установлено, что в случае возникновения нештатной ситуации, например, гидроудара в сети нефтепровода, вероятность поражения рабочего персонала на объекте защиты составит $6,80 \cdot 10^{-7}$, что эквивалентно одному погибшему человеку. Столь низкий показатель характеризует не степень опасности ситуации, а малую вероятность возникновения взрыва при разливе нефти. Однако ситуация кардинально изменится,

если в качестве транспортируемого вещества будет выступать взрывоопасный состав. Кроме того, быстрыми темпами разрабатываются и внедряются в топливно-энергетический комплекс цифровые технологии (интернет вещей, 3D-моделирование и прогнозирование на основе анализа «больших данных» и т.д.), т.е. инструмент, при помощи которого возможно предусмотреть деструктивные события, разрабатывая комплекс превентивных мероприятий.

Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года».
2. О рынке нефти. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oil-may.pdf> (дата обращения: 17.08.2022).
3. Нефтепровод Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО). URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/transportirovka-i-khranenie/141847-vostochnyy-nefteprovod-vsto/> (дата обращения: 17.08.2022).
4. Королев Д. С., Выговтов А. В., Сушко Е. А. Анализ возможных рисков пожарной опасности на действующем объекте защиты нефтегазовой отрасли // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2021. № 2. С. 44–51.
5. Королев Д. С. Концептуальная методология обеспечения пожарной безопасности в нефтегазовой отрасли // Техносферная безопасность. 2020. № 2 (27). С. 3–10.
6. Королев Д. С., Шмырева М. Б., Русских Е. А. Методика оценки материального ущерба в случае возникновения и развития чрезвычайной ситуации на объекте нефтегазовой отрасли // Техносферная безопасность. 2021. № 3 (32). С. 67–76.
7. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. М., 2006. 100 с.
8. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в трубах. М., 2021. 104 с.
9. Приказ МЧС от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
10. Федеральный закон от 24.07.1998 (в ред. от 05.04.2021) № 125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний».
11. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 09.06.2020 № 1523-r «Energeticheskaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda».
2. O rynke nefiti. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oil-may.pdf> (data obrashcheniya: 17.08.2022).

3. Nefteprovod Vostochnaya Sibir' – Tihij okean (VSTO). URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/transportirovka-i-khranenie/141847-vostochnyy-nefteprovod-vsto/> (data obrashcheniya: 17.08.2022).
4. Korolev D. S., Vytovtov A. V., Sushko E. A. Analiz vozmozhnyh riskov pozharnoj opasnosti na dejstvuyushchem ob"ekte zashchity neftegazovoj otrasli // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2021. № 2. S. 44–51.
5. Korolev D. S. Konceptual'naya metodologiya obespecheniya pozharnoj bezopasnosti v neftegazovoj otrasli // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2020. № 2 (27). S. 3–10.
6. Korolev D. S., Shmyreva M. B., Russkih E. A. Metodika ocenki material'nogo ushcherba v sluchae vozniknoveniya i razvitiya chrezvychajnoj situacii na ob"ekte neftegazovoj otrasli // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2021. № 3 (32). S. 67–76.
7. GOST 12.1.004–91. Pozharnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya. M., 2006. 100 s.
8. Zhukovskij N. E. O gidravlicheskom udare v trubah. M., 2021. 104 s.
9. Prikaz MCHS ot 10.07.2009 № 404 «Ob utverzhenii metodiki opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyh ob"ektah».
10. Federal'nyj zakon ot 24.07.1998 (v red. ot 05.04.2021) № 125-FZ «Ob obyazatel'nom social'nom strahovanii ot neschatnyh sluchaev na proizvodstve i professional'nyh zabolevanij».
11. Federal'nyj zakon ot 10.01.2002 № 7-FZ «Ob ohrane okruzhayushchej sredy».

УДК 614.841.4:004.9

ivanov.av@igps.ru

**ТУШЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ОЧАГОВ КЛАССА
«В» НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫМИ ОГNETУШАЩИМИ СОСТАВАМИ:
ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ЭФФЕКТЫ**

**REGULARITIES AND EFFECTS IN CLASS B FIRE EXTINGUISHING WITH
NANOMODIFIED FIRE EXTINGUISHING AGENTS**

*Иванов А. В., кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург*

*Ivanov A.
The Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia*

В работе приведены обобщенные результаты исследований физических свойств и огнетушащих характеристик огнетушащих составов на основе воды, раствора пенообразователя 6 масс. % и огнетушащего порошка «Вексон-АВСЕ», модифицированных углеродными наноструктурами (УНС): многослойными углеродными нанотрубками (MWCNT) и астраленами (Astr). Данные рамановской спектроскопии свидетельствуют, что при 800 °С происходит полное разрушение структуры нефункционализированных MWCNT и относительная стабильность структуры функционализированных MWCNT и Astr. Результаты синхронного термического анализа показали, что для нефункционализированных MWCNT потеря массы составила более 95 %, в то время как потеря массы образцов для MWCNT и Astr достигала 79 % и 30 % соответственно. Приведены зависимости поверхностного натяжения, кинематической вязкости, удельной теплоты парообразования модифицированных огнетушащих жидкостей, а также времени тушения модельного очага пожара класса «В» от концентрации УНС. Наибольшее сокращение времени тушения модельных очагов (до 8 раз) достигается для составов, модифицированных астраленами, которые характеризуются наибольшей термической стабильностью. В результате нейросетевого моделирования установлено, что для модифицирования огнетушащих составов целесообразнее применять наноматериалы с более высокой температурой начала процесса окисления, с концентрацией наночастиц в базовом составе 0,2 – 0,5 об. %.

Ключевые слова: астралены, многостенные углеродные нанотрубки, вода, пенообразователи, огнетушащие порошки, пожаротушение, рамановская спектроскопия, термический анализ, нейросетевое моделирование.

The article presents the generalized results of studies of the physical properties and fire extinguishing characteristics of fire extinguishing compositions based on water, a foaming agent solution of 6 wt. % and fire-extinguishing powder "Vekson-ABSE" modified with carbon nanostructures: multilayer carbon nanotubes (MWCNT) and astralenes (Astr). The results of Raman spectroscopy allow us to conclude that at 800 °C the structure of non-functionalized MWCNTs is completely destroyed and the structures of functionalized MWCNTs and Astr are relatively stable. The results of simultaneous thermal analysis showed that for non-functionalized MWCNTs, the mass loss was more than 95 %, while the mass loss of samples for MWCNTs and Astr reached 79 % and 30 %, respectively. The dependences of surface tension, kinematic viscosity, specific heat of vaporization of modified fire-extinguishing liquids, as well as the extinguishing time of a

model class "B" fire seat on the concentration of carbon nanostructures are presented. The greatest reduction in the extinguishing time of model (up to 8 times) is achieved for compositions modified with astralenes, which are characterized by the highest thermal stability. As a result of neural network modeling, it was found that for the modification of fire extinguishing compositions, it is more expedient to use nanomaterials with a higher temperature of the beginning of the oxidation process, with a concentration of nanoparticles in the base composition of 0.2 – 0.5 vol. %.

Keywords: astralenes, multi-walled carbon nanotubes, water, water film forming solution, fire extinguishing powders, firefighting, raman spectroscopy, thermal analysis, neural network modeling.

Введение

Быстрое развитие технологий влечет за собой не только увеличение рисков возникновения пожаров, но и открывает новые возможности повышения эффективности систем противопожарной защиты опасных производственных объектов. Научные исследования по разработке рецептур огнетушащих веществ (ОТВ) с повышенными эксплуатационными характеристиками активно проводятся в России и за рубежом. Современным трендом в разработке рецептур ОТВ является использование активных ингибиторов горения и смачивателей в виде наночастиц неорганических веществ с размерами около 100 нм и удельной поверхностью 25 – 100 м²/г, которые внедряются в жидкие и порошковые огнетушащие составы в концентрациях порядка 5 – 10 масс. %. Это позволяет уменьшить необходимый запас ОТВ в установках пожаротушения и сократить время ликвидации горения нефтепродуктов [1]. Углеродные наноструктуры (УНС) также показали потенциальную возможность повысить огнетушащую способность составов при концентрации активного компонента в значительно меньшей концентрации (0,1 – 1,0 об. %) [2 – 4]. Однако до настоящего времени сравнительные исследования УНС по оценке огнетушащих свойств ОТВ для пожаров класса «В» с различной термической стабильностью не проводились.

Целью настоящей работы было обобщение результатов экспериментальных исследований физических свойств и эксплуатационных характеристик ОТВ, модифицированных УНС с различной термической стабильностью, а также определение оптимальных концентраций УНС в огнетушащих составах при тушении модельных очагов класса «В».

Материалы и методы исследований

В качестве материалов для исследования выбраны: дистиллированная вода (DW), водный раствор пенообразователя (ПО) AFFF 6 масс. %, огнетушащий порошок (ОП) «Вексон-АВСЕ». Модифицирование ОТВ проводилось путем ультразвукового диспергирования в базовой жидкости (дистиллированной воде и водном растворе ПО) материалов с углеродными наноструктурами: нефункционализированными (nCNT), функционализированными многослойными углеродными нанотрубками (MWCNT) и астраленами (Astr) [3]. Модифицирование огнетушащих порошков проводилось путем механического перемешивания наноматериала с базовым составом с помощью миксера с частотой вращения 60 об/мин в течение 10 мин. Технология получения УНС описана в работе [5]. Перечень образцов для исследования приведен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень образцов ОТВ, подлежащих исследованию

№	Сокращение	Базовое вещество	Тип УНС	Конц-я УНС, об. %
1	DW	Дист. вода	–	–
2	DW-nCNT0.2 (0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5)	Дист. вода	nfCNT	0,2 – 1,5
3	DW-MWCNT0.2 (0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5)	Дист. вода	MWCNT	0,2 – 1,5
4	DW-Astr0.2 (0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5)	Дист. вода	Astr	0,2 – 1,5
5	AFFF-nCNT0.1 (0.2, 0.5, 1.0, 1.2, 1.6)	Раствор ПО AFFF 6 масс. %	nfCNT	0,1 – 1,6
6	AFFF-MWCNT0.2 (0.2, 0.5, 1.0, 1.2, 1.6)	Раствор ПО AFFF 6 масс. %	MWCNT	0,1 – 1,6
7	AFFF-Astr0.2 (0.2, 0.5, 1.0, 1.2, 1.6)	Раствор ПО AFFF 6 масс. %	Astr	0,1 – 1,6
8	ОП-nCNT0.1 (0.2, 0.5, 0.7, 1.0)	ОП «Вексон-АВСЕ»	nfCNT	0,1 – 1,5
9	ОП-MWCNT0.1 (0.2, 0.5, 0.7, 1.0)	ОП «Вексон-АВСЕ»	MWCNT	0,1 – 1,5
10	ОП-Astr0.1 (0.2, 0.5, 0.7, 1.0)	ОП «Вексон-АВСЕ»	Astr	0,1 – 1,5

Измерение рамановских спектров УНС проводилось на установке Ntegra-Spectra (исследуемый модуль: SNA, длина волны лазера – 532 нм) [2]. Термическая стабильность УНС исследовалась с помощью прибора синхронного термического анализа «NETZSCH STA 449 F3 Jupiter» (максимальная температура – 800 °С, скорость нагрева – 10 К/мин, среда – воздух) [6].

Определялись зависимости поверхностного натяжения (ПН), кинематической вязкости и удельной теплоты парообразования (УТП) наномодифицированных

жидкостей при условиях, соответствующих технологиям подготовки и подачи ОТВ [3, 4].

На лабораторной установке (рис. 1) проводилось тушение модельного очага класса «В» распыленными струями воды, растворами пенообразователей 6 масс. % [5] и огнетушащим порошком [7]. Фиксировалось время ликвидации горения очага в течение времени подачи ОТВ. Для воды и раствора ПО время тушения составляло 60 с, для ОП – до 6 с. В течение одной минуты после ликвидации горения проводилась попытка повторного поджигания паров ЛВЖ в модельном очаге.

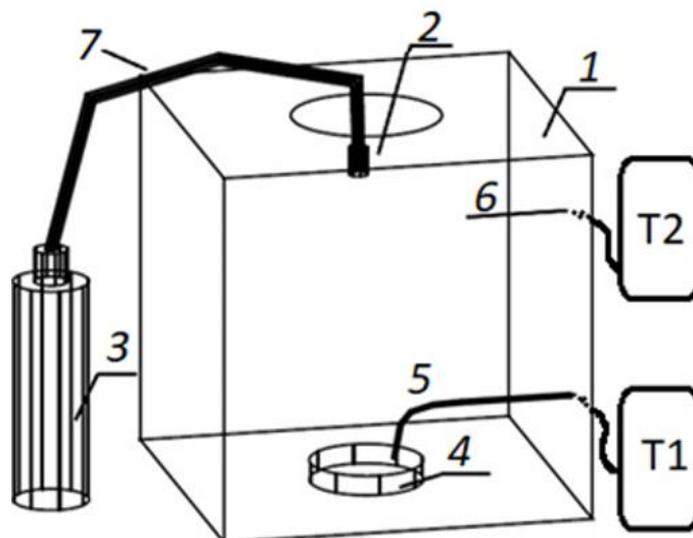


Рисунок 1. Схема лабораторной установки:

1 – металлический контейнер ($V = 0,125 \text{ м}^3$); 2 – насадок-распылитель; 3 – емкость с ОТВ объемом 5 л; 4 – емкость с бензином ($D = 0,2 \text{ м}$, $H = 0,07 \text{ м}$); 5, 6 – термопары с регистраторами; 7 – трубопровод для подачи ОТВ ($d = 0,01 \text{ м}$)

Рамановская спектроскопия образцов УНС

В рамановском спектре для всех образцов УНС, не подвергшихся нагреву в муфельной печи до $800 \text{ }^\circ\text{C}$, наблюдалась G -полоса в интервале $1500 - 1600 \text{ см}^{-1}$, соответствующая колебаниям углерода в плоскости графенового слоя [8]. D -полоса, характеризующая неупорядоченность структуры углеродного наноматериала,

наибольшим образом выражена для образца pCNT. Для данного вещества характерна наименьшая добротность, определяемая отношением интенсивности полос I_D/I_G . Материалы Astr и MWCNT имеют более высокую интенсивность G -полосы, что характеризует их как наночастицы с высокой упорядоченностью структуры. Кроме того, наибольшая симметрия пика для G -полосы характерна для материала Astr (рис. 2, а).

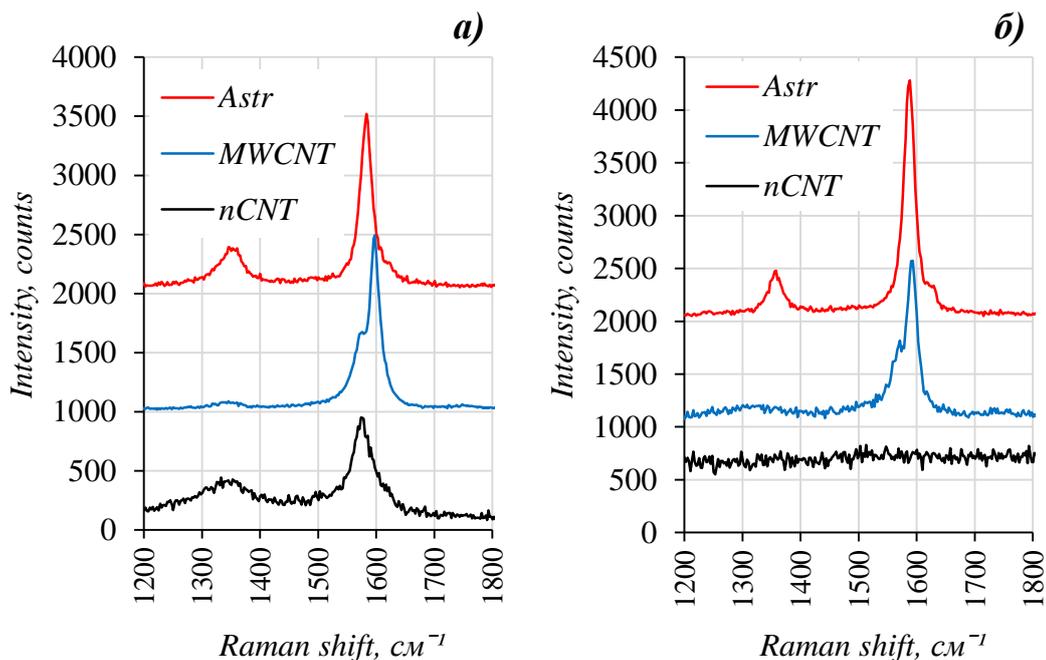


Рисунок 2. Рамановские спектры УНС: при нормальных условиях (а), после нагрева до 800 °С (б)

После нагрева в воздушной среде образцов до 800 °С наблюдался рост интенсивности *G*-полосы относительно *D*-полосы для Astr и MWCNT. Для nCNT после термического воздействия полосы *D* и *G* не фиксировались (рис. 2, б).

Термический анализ углеродных наноструктур

Результаты СТА показали существенные различия термической стабильности исследуемых наноструктур (рис. 3).

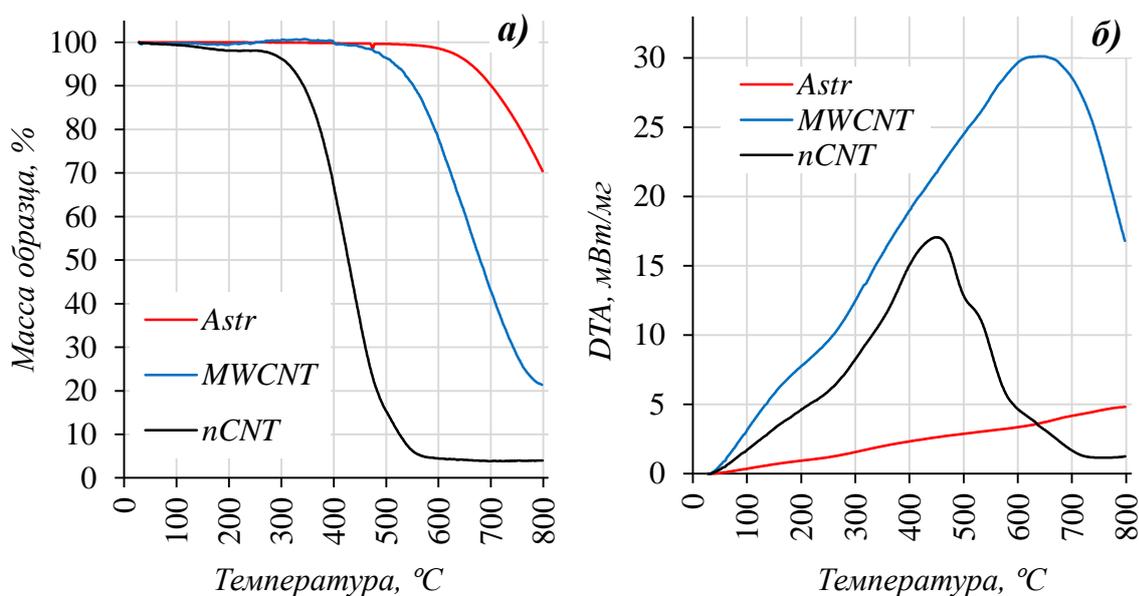


Рисунок 3. Результаты СТА УНС: ТГ (а), ДТА (б)

Начало потери массы образца наблюдалась при 580 °С для Astr, для

MWCNT и nCNT данное значение составляло соответственно 479 °С и 293 °С. Потеря массы образцов при 800 °С для Astr, MWCNT и nCNT составила 29,6 %, 79,5 % и 96 % соответственно. Максимальный тепловой эффект для MWCNT и nCNT наблюдался при температурах 655 °С и 464 °С; а для Astr данный показатель выходил за пределы измерений.

Поверхностное натяжение огнетушащих жидкостей

Результаты измерений поверхностного натяжения ОТВ приведены в табл. 2. Для составов на основе DW наблюдалось относительное снижение (до 7 %) значений ПН при концентрации УНС 0,2 об. %. В дальнейшем с увеличением концентрации до 1,0 об. % происходил рост (до 30 %) значений ПН, с дальнейшей стабилизацией данных значений.

Таблица 2

Поверхностное натяжение ОТВ

		<i>Поверхностное натяжение, Н/м</i>						
<i>УНС, об. %</i>	<i>ОТВ</i>	<i>0</i>	<i>0,2</i>	<i>0,5</i>	<i>0,7</i>	<i>1,0</i>	<i>1,2</i>	<i>1,5</i>
	DW-Astr	0,072	0,067	0,082	0,085	0,094	0,091	0,093
	DW-MWCNT		0,067	0,091	0,094	0,094	0,096	0,095
	DW-nCNT		0,066	0,064	0,061	0,063	0,067	0,074
<i>УНС, об. %</i>	<i>ОТВ</i>	<i>0</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,5</i>	<i>1,0</i>	<i>1,2</i>	<i>1,6</i>
	AFFF-Astr	0,011	0,013	0,014	0,014	0,014	0,016	0,018
	AFFF-MWCNT		0,014	0,015	0,015	0,016	0,017	0,020
	AFFF-nCNT		0,011	0,010	0,009	0,010	0,014	0,015

Растворы ПО с УНС имели существенно меньшие значения поверхностного натяжения (до 7 раз). Диспергирование Astr и MWCNT приводило к увеличению (до 40 %), а применение nCNT – к дополнительному снижению ПН (до 27 %) исследуемых ОТВ.

Вязкость огнетушащих жидкостей

Данные о кинематической вязкости ОТВ приведены в табл. 3. Увеличение концентрации Astr и MWCNT влекло за собой рост значений вязкости огнетушащих жидкостей на основе DW и AFFF до 23 % в сравнении с базовыми жидкостями.

Таблица 3

Кинематическая вязкость ОТВ

		<i>Кинематическая вязкость, мм²/с</i>						
<i>УНС, об. %</i>	<i>ОТВ</i>	<i>0</i>	<i>0,2</i>	<i>0,5</i>	<i>0,7</i>	<i>1,0</i>	<i>1,2</i>	<i>1,5</i>
	DW-Astr	1,054	1,104	1,027	1,118	1,221	1,231	1,238
	DW-MWCNT		1,112	1,121	1,192	1,192	1,235	1,293
	DW-nCNT		1,047	1,032	1,014	1,008	1,008	1,001
<i>УНС, об. %</i>	<i>ОТВ</i>	<i>0</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,5</i>	<i>1,0</i>	<i>1,2</i>	<i>1,6</i>
	AFFF-Astr	1,417	1,460	1,450	1,433	1,477	1,480	1,487
	AFFF-MWCNT		1,433	1,470	1,443	1,460	1,457	1,473
	AFFF-nCNT		1,410	1,270	1,253	1,247	1,193	1,173

Применение nCNT позволяет уменьшить УТП составов AFFF до 70 % при максимальной концентрации 1,5 об. %.

Тушение модельных очагов пожара класса «В»

Результаты исследования зависимости времени тушения модельных очагов

пожара класса «В» от концентрации УНС представлены в табл. 4. Для отдельных образцов ОТВ горение модельного очага продолжалось до момента полного выгорания ЛВЖ, из чего делался вывод, что результат тушения был неудачный.

Таблица 4
Результаты тушения модельного очага наномодифицированными ОТВ

		Время тушения модельного очага, с*/ наличие повторного воспламенения**						
УНС, об. %	ОТВ	0	0,2	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5
УНС, об. %	DW-Astr	HP	10 / +	7 / +	10 / +	11 / +	18 / +	17 / +
	DW-MWCNT		19 / +	17 / +	11 / +	10 / +	14 / +	21 / +
	DW-nCNT		34 / +	30 / +	37 / +	HP	HP	HP
УНС, об. %	AFFF-Astr	16 / –	8 / –	6 / –	11 / –	15 / +	13 / +	22 / +
	AFFF-MWCNT		10 / –	10 / –	8 / –	10 / –	19 / +	21 / +
	AFFF-nCNT		12 / –	15 / –	19 / –	23 / +	HP	HP
УНС, об. %	ОП-Astr	6 / +	3 / +	2 / +	4 / +	4 / +	HP	HP
	ОП-MWCNT		5 / +	4 / +	4 / +	6 / +	HP	HP
	ОП-nCNT		6 / +	6 / +	HP	HP	HP	HP

* «HP» неудачный результат тушения;

** «+» при внесении источника зажигания происходило воспламенение паров после ликвидации горения, «–» воспламенение паров не происходило в аналогичных условиях.

Наименьшее время тушения модельного очага (снижение до 4,5 раз в сравнении с базовыми составами) фиксировалось для суспензий DW с УНС при концентрации Astr 0,5 об. % и MWCNT 0,7 об. %. Для суспензий DW-nCNT с концентрацией УНС 1,0 – 1,5 об. % результат тушения фиксировался как неудачный. Для всех образцов суспензий фиксировалось повторное воспламенение паров ЛВЖ над поверхностью модельного очага от внесенного источника зажигания.

Для растворов ПО с УНС наименьшее время тушения фиксировалось при концентрации Astr 0,2 об. %, MWCNT 0,5 об. % и nCNT 0,2 об. % соответственно

(снижение до 8 раз в сравнении с базовыми составами). Для растворов ПО AFFF-nCNT с концентрацией УНС 1,2 об. % и 1,6 об. % результат тушения фиксировался как неудачный. Повторное воспламенение паров ЛВЖ не наблюдалось, за исключением образцов AFFF-MWCNT (1,2 об. %, 1,6 об. %) и AFFF-nCNT 1,0 об. %.

Использование Astr и MWCNT в качестве модификаторов ОП позволяет уменьшить время тушения в 1,5 – 3 раза. Максимальный огнетушащий эффект достигался при концентрации Astr 0,2 об. %. Следует отметить, что при увеличении концентрации Astr и MWCNT более

1,0 об. % эффект тушения не был достигнут. Использование пCNT в качестве модификатора не приводило к улучшению огнетушащих характеристик ОП, а при концентрации более 0,2 об. % тушения модельного очага не происходило.

Обсуждение результатов

Результаты рамановской спектроскопии образцов УНС свидетельствуют о высоком качестве материалов Astr и MWCNT, имеющих в своем составе сравнительно небольшое, относительно пCNT, количество неупорядоченного (аморфного) углерода. Снижение интенсивности D-полосы во всех образцах УНС при термическом воздействии позволяет сделать вывод о произошедшей деструкции неупорядоченного углерода в структуре наноматериала. Отсутствие G-полосы для пCNT после нагрева позволяет сделать вывод о разрушении структуры углеродного наноматериала. Наибольшая симметрия G-полосы характерна для материала Astr, что является следствием ненапряженности связей в графеновых слоях, что во многом должно обуславливать термическую стабильность наноструктур [10].

Полученные результаты согласуются с данными термического анализа, которые показали незначительную потерю массы для Astr (до 30 %) и практически полное разрушение наноматериала пCNT (свыше 95 %), что свидетельствует о большей термической стабильности Astr в сравнении с MWCNT и пCNT в условиях повышенных температур, обусловленных горением ЛВЖ.

Термическая деструкция исследуемых УНС происходит на стадиях окисления аморфного углерода при температурах 200 – 300 °С и графена при температурах от 350 °С для MWCNT и более 800 °С для Astr. Скорость термической деструкции УНС во многом зависит от концентрации аморфного углерода и конфигурации графеновых слоев наночастицы [10].

Рост поверхностного натяжения жидкостей с УНС, обусловленный ростом ван-дер-ваальсовых взаимодействий

между наноструктурами, приводит к образованию более крупных капель в установке подачи огнетушащего состава, а также влечет большие затраты энергии на их испарение за счет увеличения теплоты парообразования жидкостей [2 – 5]. Снижение ПН и УТП при концентрации УНС более 1,0 об. % предположительно связано с уменьшением стабильности наножидкостей. Вместе с тем, результаты исследований свидетельствуют об увеличении теплопроводности жидкостей на основе воды с УНС, что в свою очередь обеспечивает более интенсивный отвод тепла из зоны горения [9].

Огнетушащий эффект при использовании воды достигается за счет интенсификации теплообмена в конвекционной зоне горения, а применение растворов ПО позволяет создать пленку на поверхности ЛВЖ, снижающую интенсивность выделения горючих паров.

После ликвидации горения суспензиями воды с УНС, а также модифицированными ОП, при внесении источника зажигания происходило повторное воспламенение паров ЛВЖ в модельном очаге по причине отсутствия пленки ОТВ на поверхности жидкости, препятствующей испарению паров ЛВЖ.

В условиях применения растворов ПО происходило существенное сокращение времени тушения, до 30 % в сравнении с водными суспензиями с одинаковой концентрацией УНС. Отсутствие повторного воспламенения свидетельствует об уменьшении интенсивности парообразования ЛВЖ за счет возникновения пленки ПО на поверхности модельного очага. Повторное воспламенение паров ЛВЖ для отдельных образцов AFFF-MWCNT и AFFF-pCNT позволяет предположить отсутствие либо разрушение пленки ПО на поверхности горючей жидкости.

Исследования показали, что минимальное время ликвидации горения модельного очага характерно для огнетушащих жидкостей с концентрацией УНС 0,2 – 0,5 об. %. В условиях применения

наномодифицированных огнетушащих порошков оптимальные значения концентраций УНС составляют около 0,2 об. %.

Для оценки вклада исследуемых свойств наноструктур и модифицированных составов использовался метод нейросетевого моделирования [10]. В качестве воздействующих факторов принимались: концентрация УНС (x_1), ПН (x_2), кинематическая вязкость (x_3), УТП (x_4) жидкостей, добротность (x_5), температура начала процесса окисления (x_6), макси-

мальный тепловой эффект (x_8) при термической деструкции УНС и соответствующая ей температура (x_7). В качестве независимой переменной (Y) использовалось время тушения модельного очага. Построение НС и обработка результатов проводились в программном продукте STATISTICA (вид сети – многослойный перцептрон, скрытых нейронов: 4...20, обучающихся сетей: 200 тыс.). Из 10 полученных НС была выбрана сеть «72. MLP 7-6-1» с минимальной ошибкой обучения и контрольной выборки (табл. 5).

Таблица 5
Характеристика полученной нейронной сети

In- dex	Net. name	Training perf.	Test perf.	Valida- tion perf.	Training error	Test error	Validation error	Train- ing algo- rithm	Hidden activation	Output activa- tion
72	MLP 7-6-1	0,9808	0,9999	0,00	0,7977	0,66 43	0,7616	BFGS 99	Expo- nential	Identity

Анализ вклада переменных показывает, что наиболее важными являются ПН (x_2), УТП (x_4) жидкостей, а также температура начала процесса окисления (x_6), УНС (рис. 3).

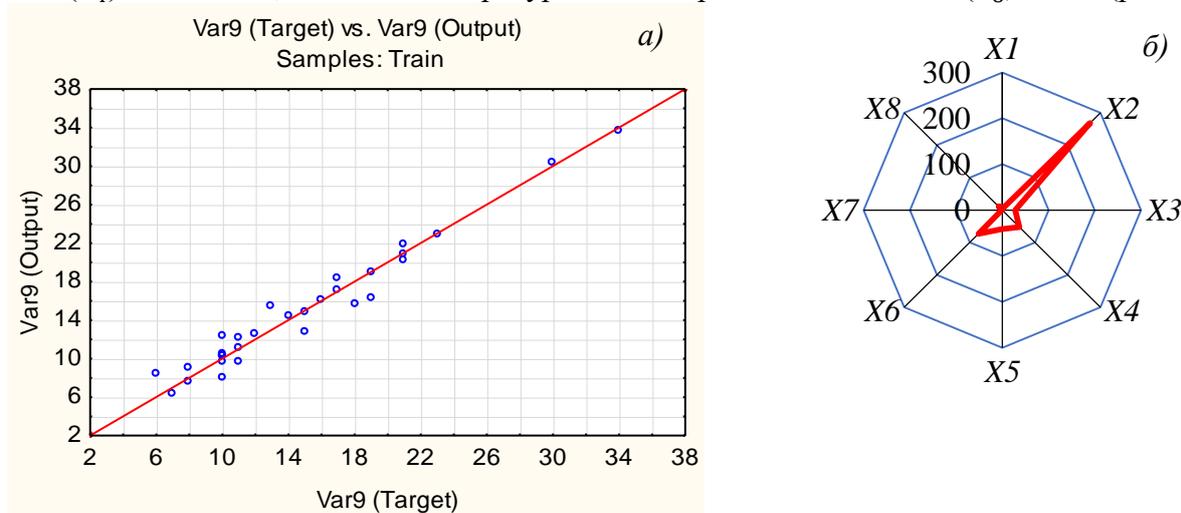


Рисунок 4. Диаграммы рассеяния целевых значений (а) и вклада переменных (б) полученной нейронной сети

Данные моделирования согласуются с результатами экспериментов, в ходе которых установлена обратная зависимость между временем тушения модельных очагов и термической стабильностью УНС. Применение образцов nCNT, характеризующихся наименьшим временем

начала процесса окисления, а также образцов ОТВ с концентрацией Astr и MWCNT 1,0 об. % и более влекло за собой кратковременное увеличение объема конвекционной зоны горения над очагом, выброс продуктов горения за пределы исследовательской камеры и увеличение времени ликвидации горения (рис. 5).



Рисунок 5. Фотография процесса тушения модельного очага с помощью ОТВ при концентрации УНС: 0,5 об. % (а), 1,0 об. % (б)

Наблюдаемый эффект, очевидно, связан с тем, что при испарении воды или попадании частиц ОП с диспергированными УНС происходит сгорание углеродных наночастиц. Несмотря на сравнительно небольшое количество УНС, тепловой эффект может быть значительным за счет высокой ($100 - 2000 \text{ м}^2/\text{г}$) удельной поверхности наночастиц и одновременным их сгоранием во всем объеме конвекционной зоны. Кроме того, избыточное количество наночастиц приводит к быстрому разрушению пленки ПО на поверхности ЛВЖ, что становится причиной увеличения времени тушения очага, либо неудовлетворительного результату пожаротушения.

Выводы:

1. Применение огнетушащих составов, модифицированных углеродными наноструктурами, позволяет сократить время ликвидации горения модельных очагов в 2 – 3 раза, в сравнении с немодифицированными ОТВ. Экспериментальным путем

определены оптимальные концентрации УНС, которые составляют 0,2 – 0,5 об. %.

2. Увеличение вязкости жидкостей при рабочих концентрациях УНС 0,2-0,5 об. % не превышает 10 % в сравнении с некодифицированными составами, что позволяет использовать ОТВ в существующих системах подачи и не требует дополнительных затрат на модернизацию систем противопожарной защиты объектов.

3. Развитие технологий наномодифицирования ОП требует дальнейшего изучения, однако закономерности влияния УНС на время ликвидации горения модельных очагов класса «В» сходны с ОТВ на основе воды и ПО.

Для достижения максимального огнетушащего эффекта и исключения повторного возгорания ЛВЖ предпочтительно использовать ОТВ на основе растворов пенообразователей с углеродными наночастицами, имеющими наибольшую температуру начала процесса окисления.

Литература

1. Rabajczyk A. et al. Nanotechnology in Fire Protection – Application and Requirements // Materials. 2021. Vol. 14. No. 24. P. 7849.
2. Иванов А. В. и др. Исследование огнетушащих свойств воды и гидрогелей с углеродными наноструктурами при ликвидации горения нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 8. С. 31–44.

- Иванов А. В. и др. Физический механизм и способ тушения жидких углеводородов модифицированными суспензиями воды с углеродными наноструктурами // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 1. С. 22–34.
- Пустовалов И. А. Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30. № 5. С. 84–97.
- Ponomarev A. N. et al. Investigation of extinguishment process of liquid hydrocarbon flames by aqueous suspensions of astralenes // Fire Technology. 2021. Vol. 57. No. 4. Pp. 2061–2075.
- Domagała K. et al. Purification and functionalisation of multi-walled carbon nanotubes // Materials Letters. 2019. Vol. 253. Pp. 272–275.
- Константинова А. С., Кожевин Д. Ф., Поляков А. С. Экспериментальная оценка влияния массы огнетушащего порошка на эффективность тушения углеводородов // Материалы юбилейного X форума «Школа молодых ученых и специалистов МЧС России». 2020. С. 196–198.
- Удовицкий В. Г. Методы оценки чистоты и характеристики свойств углеродных нанотрубок // Физическая инженерия поверхности. 2009. Т. 7. № 4. С. 351–373.
- Amiri A. et al. Pool boiling heat transfer of CNT/water nanofluids // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 71. No. 1. Pp. 450–459.
- Хабибуллина И. А. и др. Синхронный термический анализ и спектроскопия комбинационного рассеяния света как взаимодополняющие методы диагностики аллотропных форм углерода // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. № 8. С. 34–39.
- Li L. et al. Stability, thermal performance and artificial neural network modeling of viscosity and thermal conductivity of Al₂O₃-ethylene glycol nanofluids // Powder Technology. 2020. Vol. 363. Pp. 360–368.

References

- Rabajczyk A. et al. Nanotechnology in Fire Protection – Application and Requirements // Materials. 2021. Vol. 14. No. 24. P. 7849.
- Ivanov A. V. i dr. Issledovanie ognetchashchih svojstv vody i gidrogelej s uglerodnymi nanostrukturami pri likvidacii goreniya nefteproduktov // Pozharovzryvbezopasnost'. 2017. Т. 26. № 8. С. 31–44.
- Ivanov A. V. i dr. Fizicheskij mekhanizm i sposob tusheniya zhidkih uglevodorodov modifitsirovannymi suspenzijami vody s uglerodnymi nanostrukturami // Pozharovzryvbezopasnost'. 2019. Т. 28. № 1. С. 22–34.
- Pustovalov I. A. Eksperimental'noe issledovanie ognetchashchej sposobnosti modul'nyh ustanovok pozharotusheniya tonkoraspylenoj vodoj, modifitsirovannoj astralenami // Pozharovzryvbezopasnost'. 2021. Т. 30. № 5. С. 84–97.
- Ponomarev A. N. et al. Investigation of extinguishment process of liquid hydrocarbon flames by aqueous suspensions of astralenes // Fire Technology. 2021. Vol. 57. No. 4. Pp. 2061–2075.
- Domagała K. et al. Purification and functionalisation of multi-walled carbon nanotubes // Materials Letters. 2019. Vol. 253. Pp. 272–275.
- Konstantinova A. S., Kozhevin D. F., Polyakov A. S. Eksperimental'naya ocenka vliyanija massy ognetchashchego poroshka na effektivnost' tusheniya uglevodorodov // Materialy jubilejnogo X foruma «Shkola molodyh uchenyh i specialistov MCHS Rossii». 2020. С. 196–198.
- Udovickij V. G. Metody ocenki chistoty i harakterizacii svojstv uglerodnyh nanotrubok // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. 2009. Т. 7. № 4. С. 351–373.
- Amiri A. et al. Pool boiling heat transfer of CNT/water nanofluids // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 71. No. 1. Pp. 450–459.
- Habibullina I. A. i dr. Sinhronnyj termicheskij analiz i spektroskopiya kombinacionnogo rasseyanija sveta kak vzaimodopolnyayushchie metody diagnostiki allotropanyh form ugleroda // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2016. Т. 59. № 8. С. 34–39.
- Li L. et al. Stability, thermal performance and artificial neural network modeling of viscosity and thermal conductivity of Al₂O₃-ethylene glycol nanofluids // Powder Technology. 2020. Vol. 363. Pp. 360–368.

УДК 656.085.5

igps19@mail.ru

**ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ПОЖАРНОГО РИСКА
ПРИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗКАХ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ****DIAGNOSTICS AND FORECASTING OF FIRE RISK LEVEL IN RAILWAY
TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS**

*Леонтьева М. С.,
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России имени Героя Российской
Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, Санкт-Петербург*

*Leontyeva M.,
Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia named after the
Hero of the Russian Federation General of the Army E. N. Zinichev, Saint Petersburg*

В статье затрагивается проблема снижения пожарного риска при перевозках легко-воспламеняющихся веществ и материалов железнодорожным транспортом. Анализируются достоинства и недостатки известных методов и предлагаются новые эффективные подходы к снижению пожарного риска с помощью аппаратно-программного комплекса дистанционного раннего обнаружения признаков и предпосылок возникновения чрезвычайных ситуаций при транспортировке опасных грузов железнодорожным транспортом. Предложена архитектура аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего работу системы поддержки принятия решений. Концепция построения мониторинговой системы может быть успешно реализована не только на железнодорожном транспорте, но и на объектах хранения пожаро- и взрывоопасных веществ в морских портах, складах, при их транспортировке по трубопроводам и в других потенциально опасных местах, то есть является универсальной. Установлено, что методы и способы снижения пожарных рисков, основанные на раннем обнаружении признаков и предпосылок к возникновению чрезвычайных ситуаций, наиболее эффективны и экономически рациональны. В работе были использованы теоретико-эмпирические методы, методы теории автоматического управления, методы комплексного анализа и обработки данных о рисках. С целью снижения вероятности возникновения чрезвычайной ситуации разработана система, ядром которой является аппаратно-программный комплекс диагностики и прогнозирования уровня пожарного риска при железнодорожных перевозках опасных грузов. Обоснована необходимость оборудования объектов железнодорожной инфраструктуры, разработанной системой дистанционного оценивания пожарного риска.

Ключевые слова: грузоперевозки, пожарный риск, опасные грузы, система мониторинга, мониторинговая система.

The article touches upon the problem of reducing fire risk in the transportation of flammable substances and materials by rail. The advantages and disadvantages of the known methods are analyzed and new effective approaches to reducing fire risk are proposed using a hardware and software complex for remote early detection of signs and prerequisites for emergency situations during the transportation of dangerous goods by rail. The architecture of the hardware and software complex that ensures the operation of the decision support system is proposed. The concept of building a monitoring system can be successfully implemented not only in railway transport, but also at storage facilities for

fire and explosive substances in seaports, warehouses, during their transportation through pipelines and in other potentially dangerous places, that is, it is universal. It has been established that methods and methods of reducing fire risks based on early detection of signs and prerequisites for emergency situations are the most effective and economically rational. Theoretical and empirical methods, methods of the theory of automatic control, methods of complex analysis and processing of risk data were used in the work. In order to reduce the likelihood of an emergency, a system has been developed, the core of which is a hardware and software complex for diagnosing and predicting the level of fire risk during the rail transportation of dangerous goods. The necessity of equipping railway infrastructure facilities with the developed system of remote fire risk assessment is substantiated.

Keywords: fire risk, freight transportation, dangerous goods, monitoring system, hardware and software complex.

Введение

Железнодорожные составы в больших объемах перевозят опасные грузы, в том числе легковоспламеняющиеся вещества и материалы [1 – 3]. Их транспортировка сопровождается пожарными рисками. Целью статьи является снижение пожарного риска на основе использования аппаратно-программного комплекса дистанционного раннего обнаружения признаков и предпосылок возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС). Объект исследования – пожарные риски при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов. Для достижения цели исследования была сформулирована следующая научная задача: разработка и совершенствование научно-методического аппарата снижения пожарного риска при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов на основе адаптивной технологии гарантированного предотвращения пожаров.

В связи с участвовавшими случаями возникновения ЧС на грузовых железнодорожных составах [4, 5] возрастает значимость углубленного исследования, оценки и разработки новых системных подходов и механизмов управления безопасностью и устойчивостью функционирования грузового железнодорожного транспорта в условиях ЧС, что подтверждает актуальность проблемы и значимость научных разработок в этом направлении. Рассмотренные

техногенные аварии с участием опасных грузов не только на железнодорожном транспорте, но и в морских портах, складах хранения опасных веществ и материалов подтверждает гипотезу о влиянии факторов средств транспортирования и пожарной опасности самих грузов на вероятность возникновения ЧС [1, 5, 6]. Анализ научных публикаций отечественных и зарубежных учёных свидетельствует о том, что в настоящее время накоплен уже значительный опыт и теоретические основы по исследованию проблемы пожарной опасности грузоперевозок, особенностям возникновения пожаров при перевозке опасных грузов, а также тушению таких пожаров [5, 7], что является ценной базой при разработке системы дистанционного оценивания пожарного риска транспортировки опасных грузов железнодорожным транспортом.

Существенное влияние на вероятность возникновения и распространения пожара, а также его интенсивность оказывают метеоусловия (осадки, влажность, температура воздуха, направление ветра) [8]. Так, например, при транспортировке опасных грузов (легковоспламеняющихся (твердых), самовоспламеняющихся веществ и выделяющих воспламеняющиеся газы при взаимодействии с водой веществ), следует уделять внимание влажности – недостаточная влажность может способствовать самовозгоранию. Степень опасности

таких грузов устанавливают без проведения испытаний: для увлажненных взрывчатых веществ – высокая; для воспламеняющихся от трения – низкая. При контакте с кислородом воздуха некоторые вещества, такие как, например, фосфор желтый способны самовозгораться. Некоторые грузы при взаимодействии с водой могут взрываться. Они являются высокоактивными по отношению к воде. Поэтому при транспортировке их во время дождя или повышенной влажности окружающей среды эти опасные свойства грузов нужно учитывать.

С целью раннего обнаружения первичных признаков и предпосылок возгорания или взрыва посредством функционирования системы дистанционного оценивания пожарного риска транспортируемых железнодорожным транспортом опасных грузов предлагается отслеживать параметры подвижного состава и опасных грузов, при изменении которых до критических значений резко возрастает вероятность возникновения ЧС. Высокая скорость работы датчиков и надежность элементов автоматизированных систем являются необходимыми, но не достаточными условиями для эффективного управления пожарной безопасностью грузовых железнодорожных перевозок. Для обнаружений таких изменений параметров опасного груза, как температура, давление, влажность, концентрация газов и паров, необходимо манипулировать чувствительностью датчика, то есть перестраивать параметры самого датчика. Для корректного функционирования устройств зондирования производится последовательная настройка параметров датчика по информации, поступающей с контрольных пунктов зон мониторинга. При достижении критических

значений параметров опасных грузов, тревожный сигнал поступает в пункт управления безопасностью. Работает система, способная идентифицировать признаки пожароопасного состояния до возникновения горения. Для решения новой задачи по определению вероятности возникновения ЧС используем метод размытой классификации [9].

Модели и методы исследования

По показателям безопасности движения железнодорожный транспорт занимает третье место после автомобильного и воздушного [4, 6]. Статические данные последних лет свидетельствуют о значительных разрушениях, заражении местности и поражении токсичными веществами людей в результате аварийных ситуаций при транспортировке по железным дорогам опасных грузов. Наиболее отрицательным фактором перевозочного процесса опасных грузов является высокий уровень пожарного риска.

Управление пожарными рисками в ОАО «РЖД» регулируется через стандарты предприятия. Они основаны на нормативных актах Российской Федерации и процедурах управления пожарной безопасностью на объектах железнодорожного транспорта с учётом их специфики. По отношению к грузоотправителям правила перевозки опасных грузов предусматривают наличие официальных актов, подтверждающих принадлежность опасного груза к определенному номеру классификации и комплексного информационного и организационно-методического документа (аварийная карточка), расшифровки кодов (рис. 1).

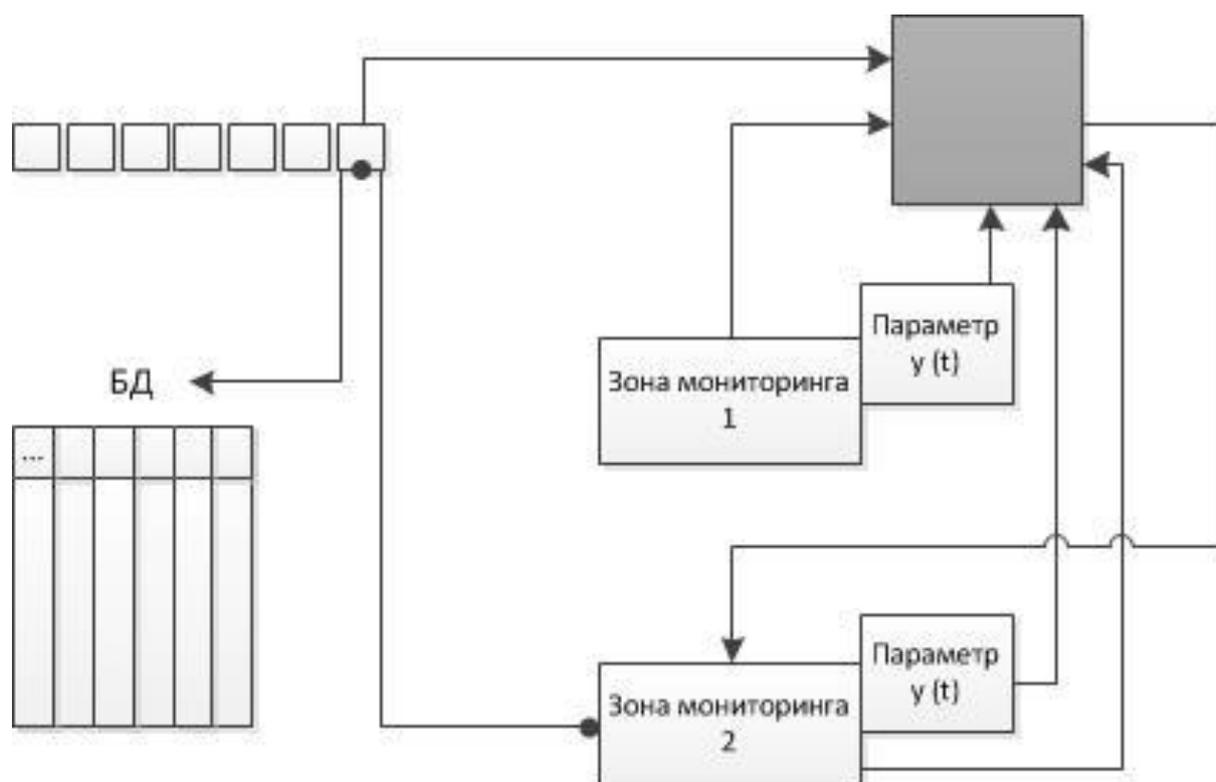


Рисунок 1. Алгоритм манипулирования комбинированными датчиками

В ходе исследования был проведен углубленный анализ и поиск методов и возможностей снижения рисков ЧС на железнодорожном транспорте при перевозке опасных грузов [10, 11]. Было установлено, что к наиболее эффективным и экономически рациональным методам снижения пожарных рисков могут быть отнесены методы и способы, основанные на раннем обнаружении признаков и предпосылок к возникновению ЧС [12, 13]. Для обоснования данного утверждения были использованы теоретико-эмпирические методы и методы комплексного анализа и обработки известных статистических данных о рисках при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов.

Неотъемлемой частью совершенствования научно-методического аппарата и обоснования применения аппаратно-программного комплекса диагностики и прогнозирования уровня пожарного риска при железнодорожных перевозках опасных грузов (АПКДП ПР) является методика снижения пожарного риска при железнодорожных перевозках опасных грузов [5,

11]. Предлагаемая методика состоит из следующих основных этапов:

1. На сортировочной станции формируется железнодорожный состав с вагонами, заполненными опасными грузами.

2. Происходит сбор информации об опасных грузах, в том числе о легковоспламеняющихся веществах и материалах, перевозимых железнодорожным составом. На этом этапе проводится также сбор и анализ (с использованием баз данных) пожароопасных характеристик грузов.

3. Происходит сбор информации о типе и технических характеристиках железнодорожных вагонов, в которых размещаются опасные легковоспламеняющиеся грузы с помощью сканирования идентификационных кодов, расположенных на вагонах.

4. Осуществляется сбор информации о маршруте следования грузового железнодорожного состава и пунктах назначения отдельных вагонов с опасными легковоспламеняющимися грузами (определяются группы вагонов, например, вагоны № 001-005 следуют до пункта «А», вагоны № 006-015 следуют до пункта «Б» и т. д.).

5. Формируется цифровая база данных (ЦБД) о маршруте следования железнодорожного состава, номерах, типах и пунктах назначения отдельных вагонов с опасными легковоспламеняющимися грузами, типах опасных легковоспламеняющихся грузов и их количестве в соответствующих вагонах. Происходит сохранение ЦБД в памяти бортового компьютера локомотивной бригады (для оперативного реагирования и получения информации о составе и грузах) и отправка её копии в центр обработки данных и принятия решений оператора перевозок (ЦОДПР ОП).

6. На пункте предварительного контроля (ППК) происходит дистанционная идентификация параметров железнодорожного состава. Отправляется сигнал активации выборки базы данных в ЦОДПР ОП. Происходит активация системы контроля параметров подвижного состава и системы контроля метеорологических параметров. После чего осуществляется дистанционная идентификация и контроль технического состояния вагонов с опасными легковоспламеняющимися грузами.

7. Результаты дистанционного контроля технического состояния вагонов с опасными легковоспламеняющимися грузами и результаты контроля метеорологических параметров отправляются в ЦОДПР ОП. Формируется и отправляется сигнал активации системы контроля параметров пожарной опасности грузов на пункт основного контроля (ПОК).

8. В ЦОДПР ОП принимают сигнал активации и выборки информации базы данных о типах вагонов и типах опасных легковоспламеняющихся грузов в них для идентифицированного железнодорожного состава. Происходит прием информации с ППК с результатами дистанционного контроля технического состояния вагонов с опасными легковоспламеняющимися грузами и результатов контроля метеорологических параметров на пути следования железнодорожного состава.

9. Осуществляется совместная обработка информации с результатами дистанционного контроля технического состояния вагонов с опасными легковоспламеняющимися грузами, результатами метеорологического контроля на пути следования железнодорожного состава и информации о типе и пожарной опасности перевозимых в соответствующих вагонах опасных грузов. Формируется по результатам обработки информации блок управляющих сигналов для конфигурирования и настройки рабочих параметров датчиков раннего распознавания опасных факторов пожара индивидуально для каждого вагона с опасным легковоспламеняющимся грузом.

10. В ПОК происходит активация системы дистанционного контроля параметров пожарной опасности грузов в железнодорожном составе. Прием от ЦОДПР ОП блока управляющих сигналов для конфигурирования и настройки рабочих параметров датчиков раннего распознавания опасных факторов пожара индивидуально для каждого вагона с опасным легковоспламеняющимся грузом. Осуществляется дистанционный контроль и сохранение информации в памяти системы дистанционного контроля параметров пожарной опасности грузов об уровне зафиксированных опасных факторов пожара для соответствующих вагонов.

11. Происходит передача сведений об уровнях зафиксированных опасных факторов пожара для соответствующих вагонов в ЦОДПР ОП. Начинается совместная обработка информации об уровнях зафиксированных опасных факторов пожара для соответствующих вагонов с результатами дистанционного контроля технического состояния данных вагонов, результатами метеорологического контроля на пути следования железнодорожного состава и информации о типе и пожарной опасности перевозимых в соответствующих вагонах опасных грузов. Происходит формирование и сохранение результатов обработки данных. На этом этапе происходит определение и присвоение уровня

опасности ЧС каждому вагону, выводится алгоритм дальнейших действий (рис. 2); μ_1 – уровень опасности ЧС низкий, возможно дальнейшее движение без ограничений, $\mu_1 \in [0 - 0,5]$; μ_2 – уровень опасности ЧС средний, необходим контроль состояния груза на ближайшей остановке по маршруту следования состава, $\mu_2 \in [0,5-0,85]$; μ_3 – уровень опасности ЧС высокий, необходимо направить состав на запасные пути в

безопасное место для немедленного контроля состояния груза) $\mu_3 \in [0,85-1]$. Математическую основу для принятия решения о принадлежности объекта и складывающейся ситуации к какому-либо классу опасности составили методы размытой классификации, позволяющие структурировать информацию об объектах с учётом нечеткости исходных данных.

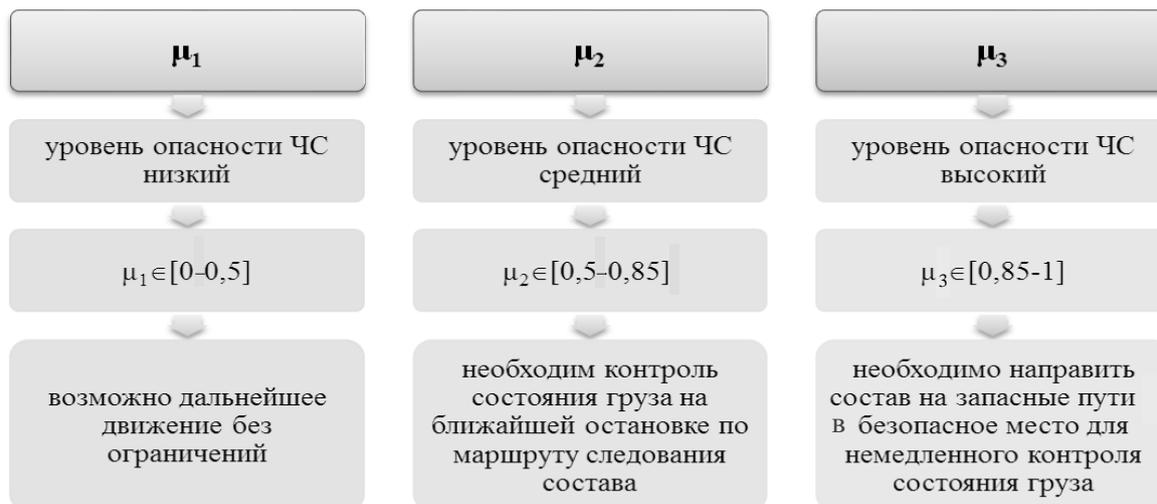


Рисунок 2. Классификация уровней опасности ЧС

Приведенная методика снижения пожарного риска при железнодорожных перевозках опасных грузов может быть реализована на основе системы поддержки

принятия решений, структурная схема которой изображена на рис. 3.

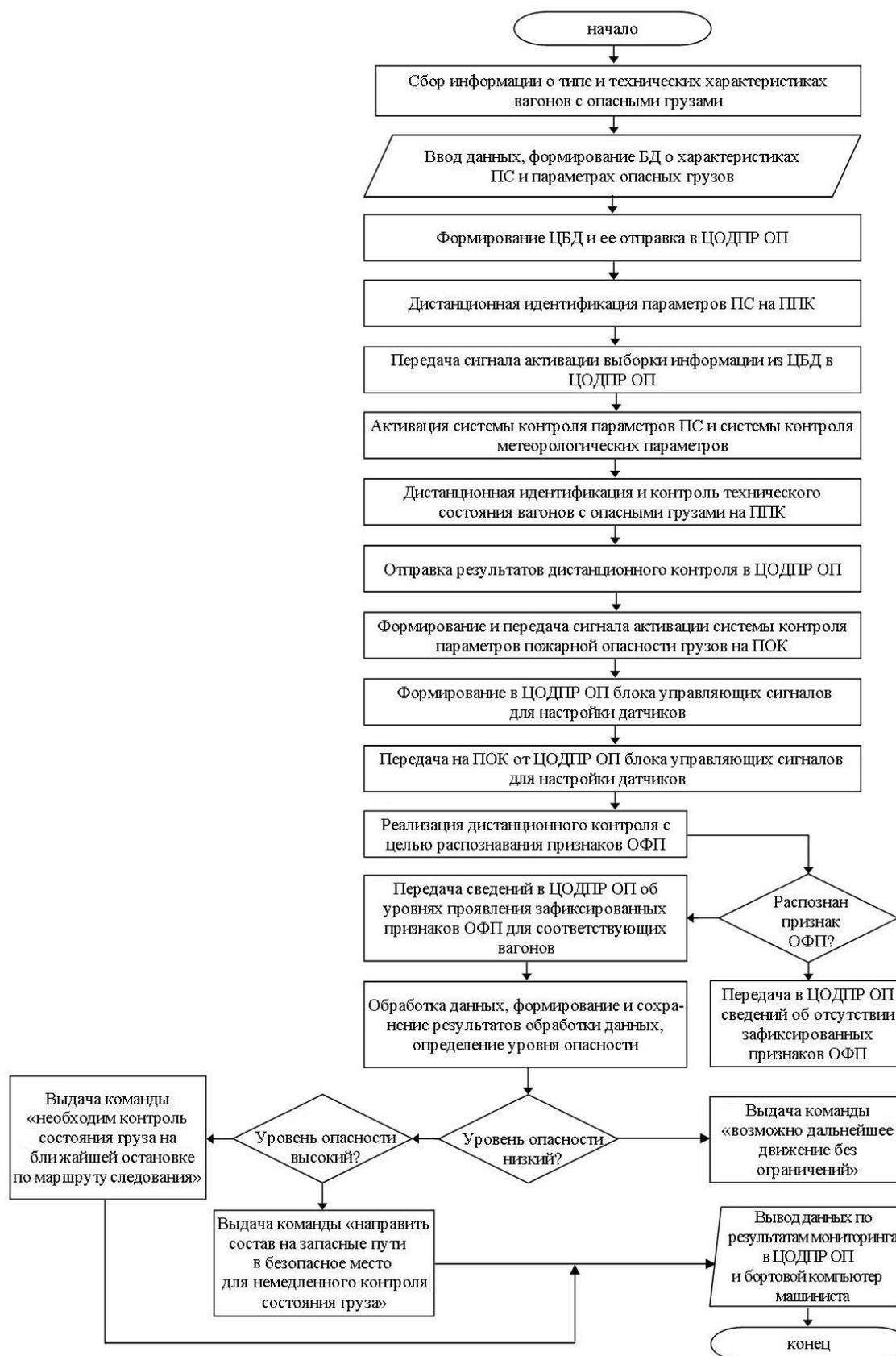


Рисунок 3. Схема алгоритма функционирования системы поддержки принятия решений

Результаты исследования и их обсуждение

Структурно-функциональная схема аппаратно-программного комплекса диа-

гностики и прогнозирования уровня пожарного риска при железнодорожных перевозках опасных грузов (АПКДП ПР) представлена на рис. 4.

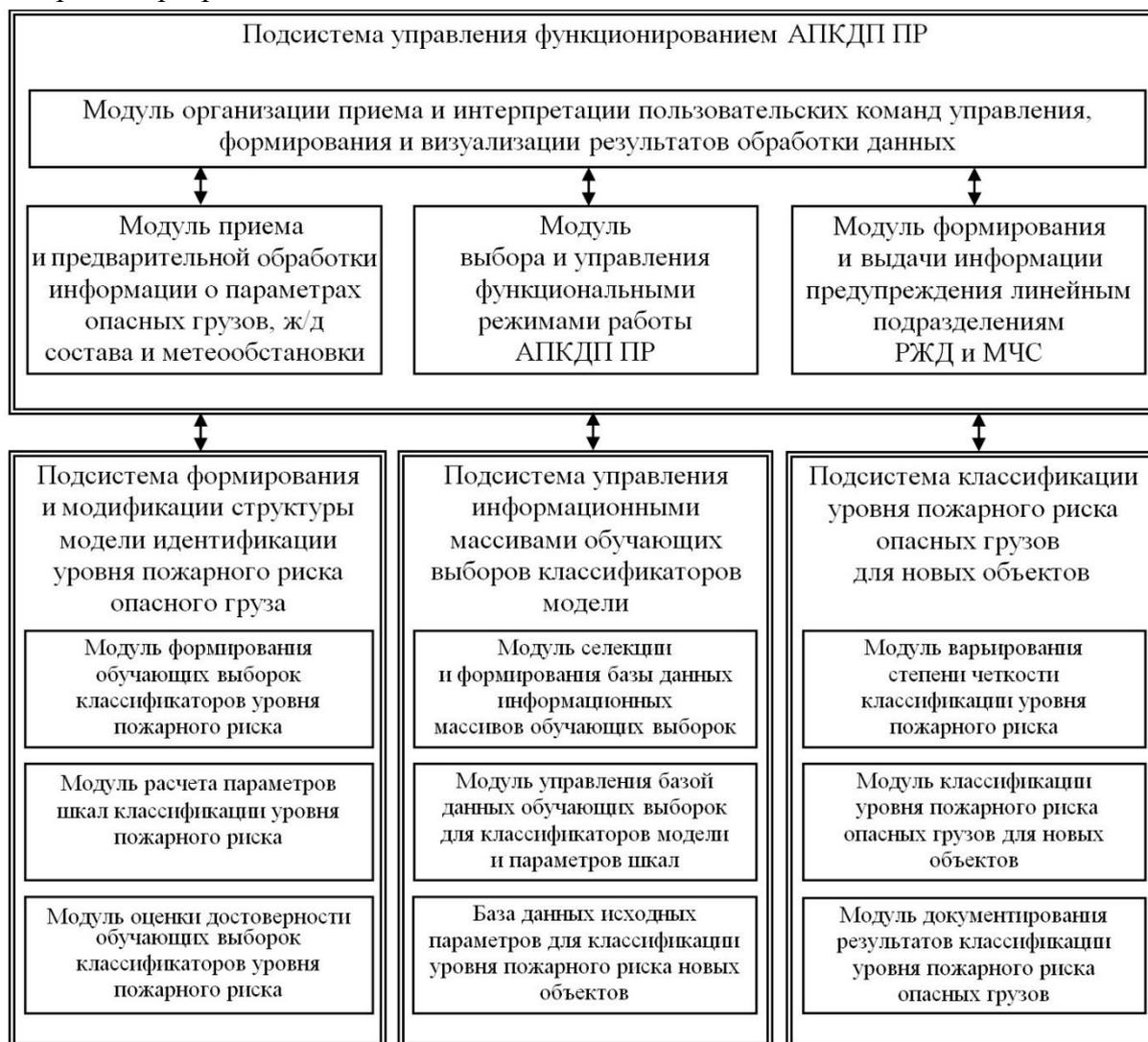


Рисунок 4. Структурная схема АПКДП ПР

Аппаратно-программный комплекс имеет открытую масштабируемую модульную структуру, позволяющую достаточно легко и оперативно вносить в нее необходимые изменения путем добавления новых модулей или корректировки имеющихся. Функционально законченные процедуры обработки данных в АПКДП ПР реализуются совокупностями модулей, объединенных в соответствующие подсистемы. В результате обработки данных система выдает значения функций принадлежности к событиям, позволяющим определить степень

возможного пожарного риска при транспортировке опасных грузов; определяются нечеткие оценки степеней принадлежности пожарного риска $\mu(W)$ к одному из классов опасности: высокий, средний, низкий.

При высоком показателе пожарного риска μ_3 требуются оперативные действия в отношении грузового состава – немедленная остановка и принятие мер по недопущению развития ЧС, привлечение пожарной охраны.

При среднем показателе пожарного риска μ_2 допустимо следовать до ближайшей остановки, с уменьшенной скоростью либо съезжать на запасной путь и обследовать грузовой состав в месте, где фиксируется тревожный сигнал, при необходимости привлечь пожарную охрану.

Низкий показатель пожарного риска μ_1 свидетельствует о благоприятной обстановке и позволяет следовать грузовому составу по установленному маршруту с принятой скоростью движения.

Предложенный алгоритм и его реализация возможна только на основе аппаратно-программного комплекса системы поддержки принятия решений [14]. В рамках исследования были программно реализованы основные компоненты структурно-функциональной схемы АПКДП ПР. Анализ функционирования разработанной системы показал, что предлагаемая система способна корректно решать стоящие перед ней задачи.

Заключение

Разработанная структура автоматизированной системы и реализованная на ее основе многоуровневая иерархическая модель позволяют проводить анализ степени влияния внутренних и внешних факторов, представленных в нечеткой расплывчатой форме на уровень ЧС в условиях динамического изменения параметров среды их функционирования.

Транспортировка опасных грузов всегда сопровождается рисками возникновения пожаров, взрывов, крушениями и авариями грузовых поездов при их погрузке и в процессе следования по маршруту.

Проведенное с помощью аппаратно-программного прототипа предлагаемой автоматизированной системы моделирование наиболее вероятных сценариев возникновения и развития чрезвычайных ситуаций при транспортировке типовых опасных грузов и сравнение полученных результатов со статистическими данными показало, что основные компоненты системы, алгоритмы их функционирования и взаимодействия между собой способны обеспечить с приемлемой достоверностью решение задачи по поддержке принятия решений о степени пожарного рисков при железнодорожной транспортировке опасных грузов. Предложена новая архитектура построения аппаратно-программного комплекса.

В целом, полученные результаты, позволяют утверждать, что целевое использование предлагаемой автоматизированной системы будет способствовать повышению эффективности и достоверности оценивания и прогнозирования изменения уровня пожарного риска при железнодорожной транспортировке опасных грузов и снижению пожарной опасности грузоперевозок.

Литература

1. Shterev D. Safety problems in maritime transport of cargoes which are able to liquefy // *Trans Motauto World*. 2021. Vol. 6. No. 1. Pp. 27–29.
2. Michael Y. Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 764. P. 142.
3. Shin S. Risk-based underground pipeline safety management considering corrosion effect // *Journal of hazardous materials*. 2018. Pp. 279–289.
4. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: стат. сб. Балашиха, 2022. 114 с.
5. Леонтьева М. С., Актерский Ю. Е. Анализ комплексной проблемы и основных факторов пожарного риска при перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов железнодорожным транспортом // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2022. № 1 (61). С. 108–116.
6. Анардович С. С., Руш Е. А. Оценка ущербов от чрезвычайных ситуаций техногенного характера на железнодорожном транспорте // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2020. № 2 (66). С. 121–128.
7. Королева Л. А. Концептуальные основы обеспечения пожарной безопасности при железнодорожных перевозках опасных грузов: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2019. 423 с.

8. Ludvigsen J., Klaboe R. Extreme weather impacts on freight railways in Europe // Natural hazards. 2014. Vol. 70. No. 1. Pp. 767–787.
9. Фалеев М. И. Программно-целевой метод решения проблем снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций // Управление рисками чрезвычайных ситуаций. 2001. С. 26–34.
10. Леонтьева М. С. Основные ресурсы и механизмы снижения пожарного риска железнодорожных перевозок опасных грузов // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. 2022. С. 326–331.
11. Леонтьева М. С., Актерский Ю. Е. Система мониторинга факторов пожарной опасности при железнодорожных перевозках опасных грузов // ОБЖ: Основы безопасности жизни. 2022. № 1. С. 60–64.
12. Шаровар Ф. И. Пожаропредупредительная автоматика. Теория и практика предотвращения пожаров от маломощных загораний. М., 2013. 555 с.
13. Патент № 2601924 Российская Федерация, МПК А62С 2/00 (2006.01). Способ гарантированного предотвращения пожаров от маломощных загораний и система автоматика для его реализации: № 2014146241/12: заявл. 18.11.2014; опубл. 10.06.2016 / Арутюнян Д. М., Шаровар Ф. И. 4 с.
14. Бадалян Н. П. Аппаратный комплекс для информационной системы поддержки принятия стандартных управленческих решений // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика. 2018. № 1. С. 32–45.

References

1. Shterev D. Safety problems in maritime transport of cargoes which are able to liquefy // Trans Motauto World. 2021. Vol. 6. No. 1. Pp. 27–29.
2. Michael Y. Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 764. P. 142.
3. Shin S. Risk-based underground pipeline safety management considering corrosion effect // Journal of hazardous materials. 2018. Pp. 279–289.
4. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2021 godu: stat. sb. Balashiha, 2022. 114 s.
5. Leont'eva M. S., Akterskij YU. E. Analiz kompleksnoj problemy i osnovnyh faktorov pozharnogo riska pri perevozkah legkovosplamenyayushchihsya veshchestv i materialov zheleznodorozhnym transportom // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022. № 1 (61). S. 108–116.
6. Anardovich S. S., Rush E. A. Ocenka ushcherbov ot chrezvychajnyh situacij tekhnogenogo haraktera na zheleznodorozhnom transporte // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2020. № 2 (66). S. 121–128.
7. Koroleva L. A. Konceptual'nye osnovy obespecheniya pozharnoj bezopasnosti pri zheleznodorozhnyh perevozkah opasnyh грузов: dis. ... d-ra tekhn. nauk. SPb., 2019. 423 s.
8. Ludvigsen J., Klaboe R. Extreme weather impacts on freight railways in Europe // Natural hazards. 2014. Vol. 70. No. 1. Pp. 767–787.
9. Faleev M. I. Programmno-celevoj metod resheniya problem snizheniya riskov i smygcheniya posledstvij chrezvychajnyh situacij // Upravlenie riskami chrezvychajnyh situacij. 2001. S. 26–34.
10. Leont'eva M. S. Osnovnye resursy i mekhanizmy snizheniya pozharnogo riska zheleznodorozhnyh perevozkop opasnyh грузов // Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovacii. 2022. S. 326–331.
11. Leont'eva M. S., Akterskij YU. E. Sistema monitoringa faktorov pozharnoj opasnosti pri zheleznodorozhnyh perevozkah opasnyh грузов // OBZH: Osnovy bezopasnosti zhizni. 2022. № 1. S. 60–64.
12. Sharovar F. I. Pozharopredupreditel'naya avtomatika. Teoriya i praktika predotvrashcheniya pozharov ot malomoshchnyh zagoranj. M., 2013. 555 s.
13. Патент № 2601924 Rossijskaya Federaciya, МПК А62С 2/00 (2006.01). Способ гарантированного предотвращения пожаров от маломощных загораний и система автоматика для его реализации: № 2014146241/12: заявл. 18.11.2014; опубл. 10.06.2016 / Арутюнян Д. М., Шаровар Ф. И. 4 с.
14. Badalyan N. P. Apparatnyj kompleks dlya informacionnoj sistemy podderzhki prinyatiya standartnyh upravlencheskih reshenij // Vestnik Nacional'nogo politekhnicheskogo universiteta Armenii. Elektrotekhnika, energetika. 2018. № 1. S. 32–45.

УДК 614.84

otdel-16@vniipo.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОГО УЩЕРБА ОТ ПОЖАРОВ НА ОБЪЕКТАХ ЗАЩИТЫ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**DETERMINATION OF MATERIAL DAMAGE FROM FIRES AT PROTECTION FACILITIES IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION**

*Загуменнова М. В.,
Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский
институт противопожарной обороны МЧС России, Балашиха*

*Zagumennova M.,
All-Russian Research Institute for Fire Protection
of EMERCOM of Russia, Balashikha*

Статья посвящена вопросам исследования экономических последствий пожаров на объектах защиты, расположенных на территории Арктической зоны Российской Федерации. В соответствии с Методическими рекомендациями об организации расчета материального ущерба от пожаров должностными лицами органов государственного пожарного надзора МЧС России, утвержденных Приказом МЧС России от 28.01.2022 № 43, проведены расчеты прямого материального ущерба от пожаров на объектах общественного и производственного назначения. Показано, что расчетный материальный ущерб от пожаров на данного типа объектах защиты Арктической зоны Российской Федерации в 5 – 6 раз превышает материальный ущерб, который фиксируется в системе учета пожаров и их последствий. Что свидетельствует о необходимости применения расчетных методов для более достоверной оценки экономических последствий пожаров. Наряду с этим расчетные методы позволяют значительно снизить процент количества пожаров без подтвержденного ущерба, регистрируемых в официальных системах статистического учета пожаров и их последствий. Использование расчетных данных об ущербе в качестве инструмента управления экономическими последствиями от пожаров позволит регулировать систему пожарной безопасности, используя язык затрат и выгод, инвестиций и страхования.

Ключевые слова: Арктическая зона, пожар, имущество, повреждение, уничтожение, материальный ущерб.

The article is devoted to the study of the economic consequences of fires on the protection objects located in the Arctic zone of the Russian Federation. In accordance with the Methodological Recommendations on the organization of calculation of the material damage from fires by officials of the State Fire Supervision Ministry of Emergency Situations of Russia, approved by Order № 43 of 28.01.2022, the calculation of direct material damage from fires on the objects of public and industrial use is carried out. It is shown that the calculated material damage from fires on this type of objects of protection of the Arctic zone of the Russian Federation in 5 – 6 times exceeds the material damage that is recorded in the system of accounting fires and their consequences. Which indicates the need for the use of calculation methods for a more reliable assessment of the economic consequences of fires. At the same time calculation methods allow a significant reduction of the percentage of fires without confirmed damage, registered in the official systems of

statistical accounting of fires and their consequences. The use of calculated data on damage as a tool of management of economic consequences from fires will allow to regulate the system of fire safety, using the language of costs and benefits, investments and insurance.

Keywords: Arctic zone, fire, property, damage, destruction, property damage.

Современный этап развития Российской Федерации предполагает интенсивное развитие ее Арктической зоны. Арктическая зона Российской Федерации (далее – АЗРФ) является геостратегической территорией, имеющей ключевое значение для обеспечения реализации национальных интересов и национальной безопасности России в Арктике.

В соответствии с Федеральным законом [1] в состав сухопутных территорий АЗРФ входят территории таких субъектов Российской Федерации, как Мурманская область, Ненецкий автономный округ, Чукотский автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ части территорий Республики Карелии, Республики Коми, Республики Саха, Красноярского края, Архангельской области.

На сегодняшний день одной из основных задач является повышение устойчивости развития и функционирования территориальных образований Арктической зоны посредством эффективного управления. Для эффективного управления целесообразно использовать информационные системы поддержки принятия решений, которые должны объединять и анализировать данные мониторинга, имеющиеся в распоряжении различных ведомств, и оценивать риски, в том числе и пожарные, по основным сферам жизнедеятельности. Для анализа риска необходимы не только знания о влиянии различных типов опасностей, но также информация об элементах и ценностях, подверженных риску. В этом контексте концептуализация и параметри-

зация текущих и будущих пожаров в Арктике имеют важное значение для управления пожарными рисками. При этом управление пожарными рисками необходимо адаптировать к изменяющемуся климату и особому экономическому развитию АЗРФ. Одним из факторов, влияющих на неопределенность прогнозирования и оценку арктических пожаров, является отсутствие согласия между данными наблюдений и официальной статистикой [2]. Особенности АЗРФ, оказывающими влияние на формирование требований к обеспечению безопасности населения и территорий, являются: экстремальные природно-климатические условия, очаговый характер промышленно-хозяйственного освоения территорий и низкая плотность населения, удаленность от основных промышленных центров, низкая устойчивость экологических систем, определяющих биологическое равновесие и климат Земли, и их зависимость даже от незначительных антропогенных воздействий [3]. С целью исследования особенностей обстановки с пожарами на объектах АЗРФ проанализированы данные о пожарах и их последствиях по четырем субъектам Российской Федерации, полностью входящим в АЗРФ. Из-за особенностей правил учета пожаров выделить отдельные территории остальных пяти субъектов, входящих в АЗРФ, достаточно затруднительно.

По данным МЧС России [4] в целом, за последние три года, в субъектах АЗРФ наблюдается тенденция к снижению числа пожаров (рис. 1).



Рисунок 1. Количество пожаров в субъектах АЗРФ за 2019-2021 гг.

Характерными пожарами в Арктическом регионе являются пожары в жилом и промышленном секторе. Количество пожаров в промышленном секторе заполярных регионов значительно выше, чем в регионах умеренного климата [5]. Учитывая, что центр тяжести нефтегазодобычи и добычи полезных ископаемых будет активно смещаться АЗРФ, там следует ожидать значительного увеличения количества потенциально опасных объектов, роста масштабов антропогенного воздействия на при-

роду и население, т. е. повышения природных и техногенных рисков для региона [6]. В табл. 1 представлены данные по пожарам и их последствиям за 2021 г. на объектах общественного и производственного назначения в исследуемых субъектах АЗРФ. Из расчетов были исключены пожары на неэксплуатируемых, строящихся, бесхозных зданиях, сооружениях, а также случаи горения мусора на объектах общественного и производственного назначения.

Таблица 1
Количество пожаров и их последствий на объектах общественного и производственного назначения в субъектах АЗРФ за 2021 г.

Субъект АЗРФ	Кол-во пожаров, ед.	Прямой ущерб, млн руб.	Зданий, сооружений уничтожено, ед.	Зданий, сооружений повреждено, ед.	Площади уничтожено, кв. м	Площади повреждено, кв. м
Ненецкий автономный округ	15	5,24	5	10	980	301
Мурманская область	108	83,33	34	46	547	1663
Ямало-Ненецкий автономный округ	144	24,17	11	120	1827	7119
Чукотский автономный округ	12	0,03	2	11	30	524

Основной причиной пожаров в Арктическом регионе Российской Федерации

является неосторожное обращение с огнем (58,7%). Вторая причина по частности

– нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования (16,2 %). И третья группа пожаров связана с нарушением правил устройства и эксплуатации печного оборудования (11,3 %). Следует отметить, что на территории Арктической зоны других государств основной причиной пожаров также является человеческий

фактор. Например, во внутренних районах Аляски, 52 % всех возгораний были вызваны людьми [7]. На рис. 2, 3 приведены данные о количестве погибших и травмированных на пожарах в субъектах АЗРФ за исследуемый период.

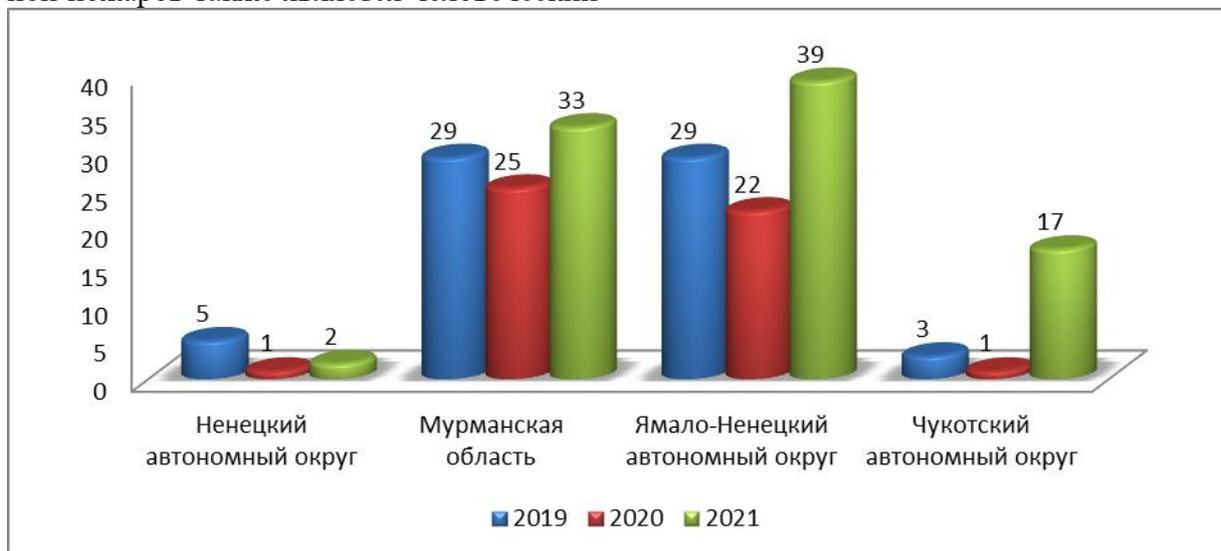


Рисунок 2. Количество погибших на пожарах в субъектах АЗРФ за 2019 – 2021 гг.

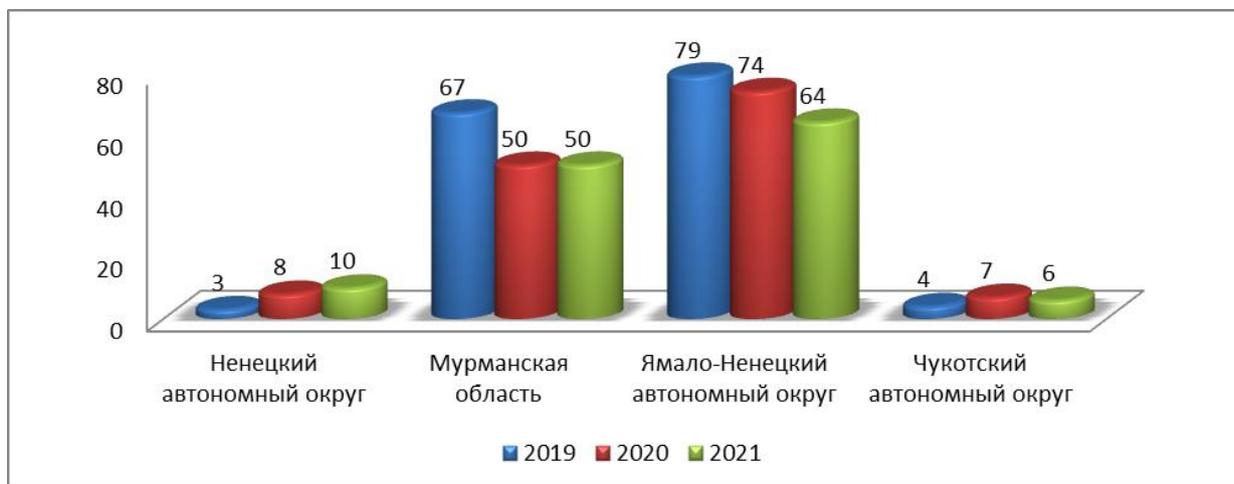


Рисунок 3. Количество травмированных на пожарах в субъектах АЗРФ за 2019 – 2021 гг.

Прогнозирование будущих моделей демографии, миграции и дальнейшее развитие АЗРФ позволяет говорить том, что эти факторы будут существенно влиять на интенсивность пожаров и их последствий в этом регионе [8]. В этих условиях одной из приоритетных и обязательных задач является обеспечение пожарной безопасности,

гарантированное спасение и сохранение жизни человека при нахождении в Арктике [9].

Важнейшей характеристикой последствий пожаров, влияющей на конкурентоспособность территории и отражающей наносимый ей урон, является материальный ущерб от пожаров. Под прямым

материальным ущербом от пожара (далее – ущерб от пожара) понимают оцененные в денежном выражении материальные ценности, уничтоженные и (или) поврежденные вследствие воздействия опасных факторов пожара и их сопутствующих проявлений. В ущерб от пожара включается ущерб, нанесенный недвижимости, основным фондам, оборотным средствам, личному имуществу граждан, ценным бумагам [10]. В настоящее время этот показатель является весьма условным, так как в соответствии с действующими правилами учета пожаров, он определяется на основании бухгалтерской справки, сведений страховых компаний, выписок из решений судебных органов, документов юридических и физических собственников имущества. Такой подход зачастую приводит к недоучету ущерба от пожара [11, 12].

В соответствии с данными, содержащимися в электронной карточке учета пожаров (далее – ЭКУП), в Ненецком автономном округе ущерб от пожаров в зданиях общественного и производственного назначения зафиксирован в 9 случаях из 15; в Мурманской области только в 16 случаях из 108; в Ямало-Ненецком автономном округе в 23 из 144; в Чукотском автономном округе 3 случая из 12 [13]. В связи с этим не перестает быть актуальной проблема совершенствования методических подходов к определению ущерба от пожаров. В частности, требованием времени является разработка научно обоснованных

расчетных методов определения ущерба от пожаров [14]. Основной проблемой при проведении адекватной оценки ущерба от пожара является сбор и обработка необходимой информации, которая будет гарантировать качество проводимой оценки [15].

В 2022 г. приказом МЧС России были утверждены Методические рекомендации об организации расчета материального ущерба от пожаров должностными лицами органов государственного пожарного надзора (далее – Методические рекомендации) [16]. В соответствии с Методическими рекомендациями определение прямого материального ущерба осуществляется по двум составляющим: ущерб, нанесенный пожаром объекту строительства, и ущерб, нанесенный пожаром имуществу. Для объектов строительства ущерб определяется исходя из вида объекта, его конструктивных характеристик, сроков эксплуатации, а также с учетом климатических особенностей каждого субъекта Российской Федерации. Применяя положения Методических рекомендаций [16] был осуществлен расчет материального ущерба от пожаров на объектах общественного и производственного назначения в субъектах АЗРФ за 2021 г. по ЭКУП без зафиксированного материального ущерба от пожаров (табл. 2).

Таблица 2
Расчетный материальный ущерб на объектах общественного и производственного назначения в субъектах АЗРФ за 2021 г.

Субъект АЗРФ	Кол-во пожаров, ед.	Зданий, сооружений уничтожено, ед.	Зданий, сооружений повреждено, ед.	Площади уничтожено, кв. м	Площади повреждено, кв. м	Расчетный материальный ущерб, млн руб.
Ненецкий автономный округ	6	1	5	60	139	28,44
Мурманская область	92	34	43	445	1364	65,68
Ямало-Ненецкий автономный округ	121	10	105	1637	5582	483,42
Чукотский автономный округ	9	2	8	30	488	25,8

При расчете материального ущерба, нанесенного пожаром объектам строительства общественного и производственного назначения, было выявлено, что основным объектом пожара в исследуемых субъектах являются бытовые, вспомогательные, временные здания и постройки (бытовка, вагончик и др.): в Мурманской области

– 60 % от общего количества пожаров общественного и производственного назначения, в Ямало-Ненецком – около 50 %.

В табл. 3 представлены данные о величине общего материального ущерба по ЭКУП с зарегистрированным материальным ущербом и расчетном ущербе, по ЭКУП без зарегистрированного материального ущерба, в соответствии с Методическими рекомендациями [16].

Таблица 3

Общий материальный ущерб от пожаров на объектах общественного

Субъект АЗРФ	Материальный ущерб, зарегистрированный в ЭКУП, млн руб.	Расчетный материальный ущерб, млн руб.	Общий материальный ущерб, млн руб.
Ненецкий автономный округ	5,24	28,44	33,68
Мурманская область	83,33	65,68	149,01
Ямало-Ненецкий автономный округ	24,17	483,42	507,59
Чукотский автономный округ	0,03	25,8	25,83
ИТОГО	112,77	603,34	716,11

и производственного назначения в субъектах АЗРФ за 2021 г.

Расчеты показали, что ущерб от пожаров в субъектах АЗРФ в целом в 5 – 6 раз больше, чем зарегистрировано в ЭКУП. Анализ данных табл. 3 подчеркивает проблему оценки всех аспектов причиненного пожаром ущерба. Применение расчетных методов даёт возможность более полно оценить реальный ущерб от пожаров и позволяет значительно снизить процент количества пожаров без подтвержденного ущерба [14].

Одним из необходимых условий успешного развития территорий АЗРФ является поддержание высокого уровня пожарной безопасности. Недостовверная оценка ущерба может привести к неэффективному финансированию территорий для поддержания необходимого уровня пожарной безопасности. Исследования показали, что расчетный материальный ущерб от пожаров на объектах общественного и производственного назначения Арктической зоны Российской Федерации в разы превышает материальный ущерб, который фик-

сируется в системе учета пожаров и их последствий. Разработанные в МЧС России Методические рекомендации направлены на повышение точности подсчета материального ущерба от пожаров. Что в свою очередь позволит значительно снизить процент количества пожаров без подтвержденного ущерба и решить задачу корректного определения материальных последствий от пожаров. Анализ и оценка ущерба от пожаров является фактором, усиливающим влияние на механизмы поддержания конкурентоспособности соответствующих территорий [17]. Следовательно, необходимо продолжать научные исследования в области оценки материальных последствий пожаров и на их основе совершенствовать способы и методы предупреждения пожаров.

Литература

1. Федеральный закон от 13.07.2020 № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357078/ (дата обращения: 28.09.2022).
2. Mccarty J. L. et al. Reviews and syntheses: Arctic fire regimes and emissions in the 21st century // *Biogeosciences*. 2021. Vol. 18. No. 18. Pp. 5053–5083.
3. Методические рекомендации по организации действий органов государственной власти и органов местного самоуправления при ликвидации чрезвычайных ситуаций. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420359157> (дата обращения: 28.09.2022).
4. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: Статистика пожаров и их последствий: стат. сб. Балашиха, 2022. 114 с.
5. Сысоева Т. П. Современные угрозы техносферной безопасности в арктической зоне Российской Федерации // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». 2021. № 30. С. 340–345.
6. Жилина И. Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски // ЭСПР. 2021. № 1 (45). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poteplenie-v-arktike-vozmozhnosti-i-riski> (дата обращения: 26.09.2022).
7. Veraverbeke S. et al. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests // *Nature Climate Change*. 2017. No. 7. Pp. 529–534.
8. Riley K. L. et al. Will Landscape Fire Increase in the Future? A Systems Approach to Climate, Fire, Fuel, and Human Drivers // *Current Pollution Reports*. 2019. No. 5 (2). Pp. 9–24.
9. Чуприян А. П. Мероприятия, проводимые МЧС России по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций в Арктике, включая вопросы аварийных разливов нефти // Международная конференция «Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктике, включая вопросы аварийных разливов нефти»: Материалы конференции. 2013. С. 13–22.
10. Приказ МЧС России от 21.11.2008 № 714 «Об утверждении Порядка учета пожаров и их последствий» (Зарегистрировано в Минюсте России 12.12.2008 № 12842). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82616 (дата обращения: 28.09.2022).
11. Полехин П. В. и др. Экономические последствия пожаров на объектах промышленности // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 7. С. 29–34.
12. Загуменнова М. В., Порошин А. А., Фирсов А. Г. Определение материального ущерба от пожаров на объектах здравоохранения // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны, Иваново. 2022. С. 124–130.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 01.07.2022 № 2022663331 / Зиннатов Д. В., Зиновьев А. В., Козлов А. А. и др. Автоматизированная аналитическая система поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России.
14. Загуменнова М. В., Порошин А. А., Фирсов А. Г. Методологический подход к определению материального ущерба от пожаров // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 4 (40). С. 64–79.
15. Опарин И. Д. Структура информации при проведении комплексной оценки ущерба от пожаров // Бизнес. Образование. Экономика: Сборник статей Международной научно-практической конференции. Минск, 2021. С. 193–196.
16. Козлов А. А. и др. Методические рекомендации об организации расчета материального ущерба от пожаров должностными лицами органов государственного пожарного надзора. Балашиха, 2022. 129 с.
17. Опарин И. Д. Методические принципы комплексной оценки ущерба от пожаров // *Техносферная безопасность*. 2020. № 2 (27). С. 64–79.

References

1. Federal'nyj zakon ot 13.07.2020 № 193-FZ «O gosudarstvennoj podderzhke predprinimatel'skoj deyatel'nosti v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federacii». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357078/ (data obrashcheniya: 28.09.2022).
2. Mccarty J. L. et al. Reviews and syntheses: Arctic fire regimes and emissions in the 21st century // *Biogeosciences*. 2021. Vol. 18. No. 18. Pp. 5053–5083.
3. Metodicheskie rekomendacii po organizacii dejstvij organov gosudarstvennoj vlasti i organov mestnogo samoupravleniya pri likvidacii chrezvychajnyh situacij. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420359157> (data obrashcheniya: 28.09.2022).
4. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2021 godu: Statistika pozharov i ih posledstvij: stat. sb. Balashiha, 2022. 114 s.

5. Sysoeva T. P. Sovremennye ugrozy tekhnosfernoj bezopasnosti v arkticheskoj zone Rossijskoj Federacii // *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Sistemy bezopasnosti»*. 2021. № 30. S. 340–345.
6. Zhilina I. YU. Poteplenie v Arktike: vozmozhnosti i riski // *ESPR*. 2021. № 1 (45). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poteplenie-v-arktike-vozmozhnosti-i-riski> (data obrashcheniya: 26.09.2022).
7. Veraverbeke S. et al. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests // *Nature Climate Change*. 2017. No. 7. Pp. 529–534.
8. Riley K. L. et al. Will Landscape Fire Increase in the Future? A Systems Approach to Climate, Fire, Fuel, and Human Drivers // *Current Pollution Reports*. 2019. No. 5 (2). Pp. 9–24.
9. Chupriyan A. P. Meropriyatiya, provodimye MCHS Rossii po preduprezhdeniyu i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij v Arktike, vklyuchaya voprosy avarijnyh razlivov nefi // *Mezhdunarodnaya konferenciya «Problemy preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnyh situacij v Arktike, vklyuchaya voprosy avarijnyh razlivov nefi»*: Materialy konferencii. 2013. S. 13–22.
10. Prikaz MCHS Rossii ot 21.11.2008 № 714 «Ob utverzhdenii Poryadka ucheta pozharov i ih posledstvij» (Zaregistrirvano v Minyuste Rossii 12.12.2008 № 12842). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82616 (data obrashcheniya: 28.09.2022).
11. Polekhin P. V. i dr. Ekonomicheskie posledstviya pozharov na ob"ektah promyshlennosti // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2022. № 7. S. 29–34.
12. Zagumennova M. V., Poroshin A. A., Firsov A. G. Opredelenie material'nogo ushcherba ot pozharov na ob"ektah zdavoohraneniya // *Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya inzhenernyh sistem obespecheniya pozharnoj bezopasnosti ob"ektov: Sbornik materialov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 90-letiyu obrazovaniya grazhdanskoj oborony, Ivanovo*. 2022. S. 124–130.
13. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM ot 01.07.2022 № 2022663331 / Zinnatov D. V., Zinov'ev A. V., Kozlov A. A. i dr. Avtomatizirovannaya analiticheskaya sistema podderzhki i upravleniya kontrol'no-nadzornymi organami MCHS Rossii.
14. Zagumennova M. V., Poroshin A. A., Firsov A. G. Metodologicheskij podhod k opredeleniyu material'nogo ushcherba ot pozharov // *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*. 2021. № 4 (40). S. 64–79.
15. Oparin I. D. Struktura informacii pri provedenii kompleksnoj ocenki ushcherba ot pozharov // *Biznes. Obrazovanie. Ekonomika: Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Minsk, 2021. S. 193–196.
16. Kozlov A. A. i dr. Metodicheskie rekomendacii ob organizacii rascheta material'nogo ushcherba ot pozharov dolzhnostnymi licami organov gosudarstvennogo pozharnogo nadzora. Balashiha, 2022. 129 s.
17. Oparin I. D. Metodicheskie principy kompleksnoj ocenki ushcherba ot pozharov // *Tekhnosfernaya bezopasnost'*. 2020. № 2 (27). S. 64–79.

УДК 614.84

parf01@inbox.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА ПРИ ОЦЕНКЕ
ЗНАЧЕНИЙ ПОЖАРНЫХ РИСКОВ ДЛЯ МНОГОТОПЛИВНЫХ
АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ**

**APPLICATION OF A PROBABILISTIC APPROACH TO THE ASSESSMENT
OF FIRE RISK VALUES FOR MULTIFUEL PETROL STATIONS**

*Парфёненко А. П., кандидат технических наук, доцент,
Тимофеев А. Б.,*

*Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет, Москва*

Брюхов Е.Н., кандидат педагогических наук

Уральский институт Государственной противопожарной службы, Екатеринбург

Parfyonenko A., Timofeev A.,

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

Bryukhov E.,

Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg

В статье описаны основные положения нормативно-правовой базы по проектированию автомобильной газозаправочной станции, выполненной как самостоятельный участок многотопливной автомобильной заправочной станции (АЗС) на противопожарных расстояниях по отношению к объектам, не относящимся к технологическому оборудованию сжиженного углеводородного газа, а также на территории в составе многотопливной АЗС, представлены основание и необходимость разработки специальных технических условий на проектирование противопожарной защиты модульной автомобильной газозаправочной станции и обоснована необходимость включения типовых дополнительных мероприятий, отсутствующих в нормативных документах. Показаны неучтенные в существующей методике по определению расчетных величин пожарного риска на производственных объектах доли времени присутствия потребителей топлива на многотопливной АЗС, результаты расчетных величин индивидуального пожарного риска для потребителей сжиженного углеводородного газа и жидкого моторного топлива без и с учетом принятых проектных решений в части производственных программ технологического участка сжиженного углеводородного газа и участка жидкого моторного топлива многотопливной АЗС. Разработаны организационно-технические мероприятия, обеспечивающие нормативные значения расчетных величин пожарного риска для потребителей сжиженного углеводородного газа и жидкого моторного топлива на многотопливных АЗС.

Ключевые слова: пожарный риск, противопожарные расстояния, безопасность людей, пожарная безопасность, противопожарная преграда.

The article describes the main provisions of the regulatory framework for the design of an automobile gas filling station, made as an independent section of a multi-fuel automobile filling station (gas station) at fire-fighting distances in relation to objects that are not related to the technological equipment of liquefied petroleum gas, as well as on the territory of a multi-fuel gas station, the basis and necessity of developing special technical conditions for the design of fire protection of a modular automobile gas station and the

inclusion of standard additional measures that are not included in regulatory documents. The results of the calculated values of individual fire risk for consumers of liquefied petroleum gas and liquid motor fuel without and taking into account the adopted design decisions regarding the production programs of the technological section of liquefied petroleum gas and the section of liquid motor fuel are shown, unaccounted for in the existing methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities, the proportion of the time of the presence of fuel consumers at a multi-fuel gas station, the results of the calculated values of individual fire risk for consumers of liquefied petroleum gas and liquid motor fuel without and taking into account the design decisions taken in terms of the production programs of the technological section of liquefied petroleum gas and the section of liquid motor fuel multi-fuel gas station. Organizational and technical measures have been developed to ensure regulatory values of calculated fire risk values for consumers of liquefied petroleum gas and liquid motor fuel at multi-fuel filling stations.

Keywords: fire risk, fire distances, human safety, fire safety, fire barrier.

Введение

В связи со стремительным темпом роста численности людей на Земле, растет и количество транспортных средств, что ведет к развитию транспортной инфраструктуры.

Одним из наиболее востребованных и доступных видов транспортных средств является автомобиль. Однако автомобильный транспорт – один из наиболее загрязняющих источников выбросов веществ в атмосферу. Постоянный рост цен на традиционные виды топлива (бензин и дизельное топливо) вынуждают потребителей и государство всех стран мира переходить на альтернативные виды топлива такие, как компримированный природный газ (КПГ), сжиженный углеводородный газ (СУГ).

Анализ нормативно-правовой базы при проектировании многотопливной автозаправочной станции (МАЗС)

Правительством Российской Федерации утверждена Энергетическая стратегия, целью которой является развитие энергетики Российской Федерации максимальное содействие социально-экономическому развитию страны, укрепление и сохранение позиций Российской Федерации в мировой энергетике как минимум на период до 2035 г. [1]. Для достижения целей, указанных в [1], разработана «дорожная карта» по развитию рынка малотоннаж-

ного сжиженного природного газа и газомоторного топлива в Российской Федерации на период до 2025 г. [2].

Действие данных документов предполагает создание новых автомобильных газозаправочных станций (АГЗС), а также реконструкцию существующих автомобильных заправочных станций (АЗС).

С экономической точки зрения в населенных пунктах устройство самостоятельных АГЗС влечет за собой большие денежные затраты, поэтому на существующих автомобильных заправочных станциях (АЗС) с жидким моторным топливом (ЖМТ) устраивают самостоятельные участки СУГ и переводят АЗС с ЖМТ в МАЗС.

Для простоты монтажа и минимальных затрат участка СУГ владельцы АЗС устанавливают модульную насосную заправочную станцию с трубопроводной обвязкой (МНЗС), укомплектованную надземным одностенным резервуаром СУГ (модуль СУГ) объемом 10 м³, запорной и регулирующей арматурой, насосным агрегатом с трубопроводной обвязкой и газозаправочной колонкой (ГЗК) на единой металлической раме заводского изготовления.

Требования пожарной безопасности к размещению самостоятельного участка СУГ МАЗС по отношению к существую-

щим зданиям, сооружениям, технологическому оборудованию на территории МАЗС и к объектам, не относящимся к МАЗС, регламентируются [3]. При этом минимальные противопожарные расстояния, устанавливаемые [3], ввиду ограниченности территории АЗС выполнить сложно, для безопасности людей на территории МАЗС, и за ее пределами противопожарное расстояние необходимо подтвердить расчетом величин пожарного риска согласно Методике [4].

Нормативный документ [3] не входит в перечень, утвержденный [5], с учетом ст. 6 и ч. 6 ст. 15 [7], поэтому требования, изложенные в нем, не могут носить обязательный характер с учетом ч. 3 ст. 16.1 [7].

В соответствии с положениями ч. 1 ст. 6 [9] пожарная безопасность объекта защиты считается обеспеченной при условии, что пожарный риск не превышает допустимых значений, установленных ст. 93 [9].

Однако требования пожарной безопасности к устройству МНЗС с одностенным модулем СУГ и ГЗК на единой металлической раме заводского изготовления отсутствуют и поэтому в соответствии с ч. 2 ст. 78 [9] должны быть разработаны специальные технические условия (СТУ), отражающие специфику обеспечения их пожарной безопасности и содержащие комплекс необходимых инженерно-технических и организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

Для владельцев сети АЗС разработка и согласование СТУ для каждого объекта защиты также являются долгими и затратными работами, поэтому внесение изменений в нормативно-правовую базу [3] по проектированию МНЗС является актуальной темой.

Типовые решения (компенсирующие мероприятия), разрабатываемые в СТУ

СТУ разрабатываются на основании [9 – 15] и не могут распространяться на типовые объекты защиты.

Необходимость разработки СТУ обусловлена отсутствием нормативных требований пожарной безопасности в части:

- проектирования МНЗС с наземным расположением одностенного резервуара хранения СУГ, трубопроводной обвязки, насосного агрегата и ГЗК на металлической раме как единого заводского изделия в составе МАЗС;
- выбора типа противопожарной преграды между участком СУГ (при несоответствии противопожарных расстояний в соответствии с требованиями [3]).

В пояснительной записке СТУ вводится термин (определение): модульная автозаправочная станция с СУГ - АЗС (самостоятельный участок МАЗС), технологическая система которой предназначена для приема, хранения и выдачи СУГ потребителю и характеризуется надземным расположением резервуара с размещением технологического оборудования, на единой металлической раме, выполненной как единое заводское изделие.

Дополнительные компенсирующие мероприятия [16]:

- предусмотреть модуль (двустенный надземный резервуар объемом не более 10 м³ с конструктивной огнезащитой, приравненный в соответствии с требованиями [3] к подземному) с трубопроводной обвязкой и ГЗК СУГ, выполненный как единое заводское изделие;
- предусмотреть вывод сигналов о срабатывании АПС в помещение дежурного персонала (здания операторной) и дублирование этих сигналов на пульт пожарной охраны без участия персонала объекта и (или) транслирующей этот сигнал организации в главное управление МЧС России по субъекту;
- предусмотреть доставку СУГ на МАЗС автоцистернами типа АЦТ-10УН или автоцистернами с аналогичными характеристиками и системой безопасности объемом не более 10 м³;
- оборудовать резервуар хранения СУГ управляемыми донными клапанами с

местным (на патрубках резервуара), дистанционным (из операторной) и автоматическим пуском (от сигнализаторов дозрывоопасных концентраций), а также обеспечить ввод трубопроводов для паровой и жидкой фаз СУГ в резервуар для хранения СУГ в двустенном исполнении до электромагнитных клапанов, с заполнением межстенного пространства инертным газом или вместо управляемого донного клапана следует предусмотреть на каждом из указанных трубопроводов дополнительные быстродействующие электромагнитные клапаны (являющие элементами дублирования) с временем срабатывания не более одной секунды от сигнализаторов дозрывоопасных концентраций и системы автоматической пожарной сигнализации;

– допускается уменьшение минимального противопожарного расстояния от участка СУГ в модульном исполнении с площадкой для АЦТ до объекта, где не соответствует противопожарное расстояние (в соответствии с требованиями [3]), при этом на данном противопожарном расстоянии следует предусматривать противопожарную преграду (в виде противопожарной преграды в соответствии со ст. 37 [9] может выступать противопожарная стена 1-го типа или противопожарный разрыв), обеспечивающую снижение расчетных величин пожарного риска до допустимых значений, установленных ст. 93 [9].

Следует учесть, что минимальное противопожарное расстояние обеспечивает допустимую величину пожарного риска, и при этом безопасность людей гарантируется, если нет, то необходимо предусматривать противопожарную стену 1-го типа размерами, обеспечивающими снижение расчетных величин пожарного риска до допустимых значений (в данном случае в расчетах может не использоваться сценарий поражения людей горизонтальным факелом горения СУГ при разгерметизации технологических трубопроводов, но минимальные геометрические параметры стены должны превышать модуль более чем на 0,5 м., во все стороны).

Методика определения расчетных величин пожарного риска

Для определения расчетных величин пожарного риска разработана Методика [4] и [17,18] устанавливающая порядок расчета величин пожарного риска на МАЗС.

Индивидуальный пожарный риск на территории и в зданиях МАЗС, в том числе за территорией объекта (селитебной зоне) значительно зависит от вероятности нахождения людей в определенной зоне (территории) и оценивается частотой поражения опасными факторами пожара (ОФП).

Однако в соответствии с п. 37 [4] индивидуальный пожарный риск в здании, сооружении и на территории МАЗС определяется только для работников (персонала) объекта защиты и в случае превышения допустимого значения пожарного риска, установленного ч. 1 ст. 93 [9], допускается увеличение величины пожарного риска, согласно ч. 3 ст. 93 [9], но не для потребителей топлива, что в значительной степени повлияет на расчетные величины пожарного риска, и противоречит п. 9.1 [3] (также отсутствует конкретизация, для какого контингента распространяется ч. 1 ст. 93 [9], так как доля времени присутствия людей на территории МАЗС не регламентирована. В селитебной зоне долю времени присутствия людей допускается принимать согласно организационно-распорядительным документам для зданий и сооружений при некруглосуточном режиме работы, при круглосуточном режиме доля времени присутствия людей равна 1).

Необходим единый подход к определению доли времени присутствия людей на территории МАЗС, далее показан расчет величин пожарного риска с учетом принятых проектных решений согласно разделу проектной документации «Технологические решения».

Данные вероятности непосредственно влияют на значение величин пожарного риска, результаты показаны с уче-

том принятых проектных решений (производственных программ участка СУГ и ЖМТ), указанных в таблице 1 и 2.

Таблица 1
Производственная программа участка СУГ

№	Наименование параметра и размера, единица физической величины	Показатель
1	Производительность, заправок в сутки	45
2	Рабочее давление, МПа	1,6
3	Пробное давление, МПа	2,0
4	Количество резервуаров объемом не более $V = 10 \text{ м}^3$	1
5	Объем коммерческий СУГ для резервуаров, не более, м^3	10
6	Количество обслуживающего персонала, чел.	3
7	Количество топливозаправочных колонок, не более, шт.	1
8	Количество насосов, не более, шт.	2
9	Время заправки автомобилей при расчетном объеме 40 дм^3 (с учетом времени подключения и отключения), не более, мин	5
10	Время наполнения резервуара, не более, ч	3
11	Мощность установленного оборудования (0,4 кВ, 50 Гц), не более, кВт	5,5
12	Напряжение питания, В	220/380
13	Максимальный расход СУГ (максимальная производительность заправки СУГ), $\text{дм}^3/\text{мин}$	50
14	Масса оборудования с учетом шкафа управления, не более, кг	6500
15	Габаритные размеры, не более, мм	
	длина	8423
	ширина	2640
	высота (с учетом сбросной свечи)	3584
	высота (без учета сбросной свечи)	2663
16	Параметры резервуара	
16.1	Давление, МПа	
	рабочее давление, макс.	1,6
	пробное давление	2,0
16.2	Рабочая среда	Газ сжиженный углеводородный по ГОСТ 24578
17	Время нахождения АЦ на МАЗК не более, ч	3
18	Годовое количество заливок резервуаров, единиц	53

Таблица 2
Производственная программа участка ЖМТ

№	Наименование показателя	Значение показателя		
		Бензин		ДТ
		АИ-95 50м ³ (2×25м ³)	АИ-92 25 м ³	
1	Количество постов заправки	6	6	8
2	Максимальная пропускная способность поста, заправок в час	30	30	30
3	Продолжительность смены, час	24		
4	Число смен	1		
5	Количество человек в смене	2		
6	Число рабочих дней в году	365		
7	Суточное количество заправок	132	171	81
8	Годовое количество заправок	48180	62415	29565
9	Объем одной заправки в литрах	28	28	28
10	Суточный объем заправок в литрах	3696	4788	2268
11	Годовой объем заправок в литрах	1349040	1747620	827820
12	Суточное количество заправок резервуаров	0,82	0,82	0,82
13	Годовое количество заправок резервуаров	300	300	300
14	Время нахождения АЦ на МАЗК, ч	1	1	1

Определение условных вероятностей работы технологического оборудования, нахождения АЦТ, автомобилей для заправки СУГ и ЖМТ

Вероятность присутствия АЦТ-10УН (или аналог) на территории МАЗС (нахождение АЦТ на территории не более 3 часов 53 дня в году, при этом нахождение 2-х цистерн и более не допускается):

– вероятность присутствия АЦТ-10УН (или аналог) в течении года:

$$P_{\text{АЦТ.СУГ}} = \frac{53\text{дня} \cdot 3\text{часа}}{365\text{дней} \cdot 24\text{часа}} = 0,01815\text{год}^{-1}.$$

Вероятность присутствия АЦТ с ЖМТ на территории МАЗС:

– вероятность присутствия АЦТ с бензином АИ-95 в течение года (нахождение АЦТ на территории не более одного часа 300 дней в году, при этом нахождение двух цистерн и более не допускается):

$$P_{\text{АЦТ.ЖМТ.АИ-95}} = \frac{300\text{дней} \cdot 1\text{час}}{365\text{дней} \cdot 24\text{часа}} = 0,03424\text{год}^{-1};$$

– вероятность присутствия АЦТ с бензином АИ-92 в течение года (нахождение АЦТ на территории не более одного часа 300 дней в году, при этом нахождение двух цистерн и более не допускается):

$$P_{\text{АЦТ.ЖМТ.АИ-92}} = \frac{300\text{дней} \cdot 1\text{час}}{365\text{дней} \cdot 24\text{часа}} = 0,03424\text{год}^{-1};$$

– вероятность присутствия АЦТ с ДТ в течение года (нахождение АЦТ на территории не более одного часа 300 дней в году, при этом нахождение двух цистерн и более не допускается):

$$P_{\text{АЦТ.ЖМТ.ДТ}} = \frac{300\text{дней} \cdot 1\text{час}}{365\text{дней} \cdot 24\text{часа}} = 0,03424\text{год}^{-1}.$$

Вероятность присутствия автомобиля для заправки СУГ на территории МАЗС (максимальное число заправок в сутки 45 раз и времени заправки не более 5 минут):

$$P_{\text{АВТО.СУГ}} = \frac{365 \text{дней} \cdot 45 \text{раз} \cdot \left(\frac{5}{60}\right) \text{ часа}}{365 \text{дней} \cdot 24 \text{часа}} =$$

$$= 0,15625 \text{год}^{-1}.$$

Вероятность работы насоса СУГ, исходя из 45 заправок в сутки при среднем времени заполнения бака не более 2 минут:

$$P_{\text{НАСОС.СУГ}} = \frac{365 \text{дней} \cdot 45 \text{раз} \cdot \left(\frac{2}{60}\right) \text{ часа}}{365 \text{дней} \cdot 24 \text{часа}} =$$

$$= 0,0625 \text{год}^{-1}.$$

Вероятность наполненного рукава ГЗК СУГ, исходя из 45 заправок в сутки при среднем времени заполнения бака не более 2 минут:

$$P_{\text{ГЗК.СУГ}} = \frac{365 \text{дней} \cdot 45 \text{раз} \cdot \left(\frac{2}{60}\right) \text{ часа}}{365 \text{дней} \cdot 24 \text{часа}} =$$

$$= 0,0625 \text{год}^{-1}.$$

Вероятность наполненного рукава ТРК ЖМТ:

– для ТРК с бензином АИ-95, исходя из 132 заправок в сутки при объеме одной заправки 28 литров и подачи ТРК 50 л/мин:

$$P_{\text{ТРК.ЖМТ.АИ-95}} =$$

$$= \frac{365 \text{дней} \cdot 132 \cdot 28 \cdot \left(\frac{1}{60}\right) \text{ часа}}{365 \text{дней} \cdot 50 \cdot 24 \text{часа}} =$$

$$= 0,051333 \text{год}^{-1};$$

– для ТРК с бензином АИ-92, исходя из 171 заправки в сутки при объеме одной заправки 28 литров и подачи ТРК 50 л/мин:

$$P_{\text{ТРК.ЖМТ.АИ-92}} =$$

$$= \frac{365 \text{дней} \cdot 171 \cdot 28 \cdot \left(\frac{1}{60}\right) \text{ часа}}{365 \text{дней} \cdot 50 \cdot 24 \text{часа}} =$$

$$= 0,0665 \text{год}^{-1};$$

– для ТРК с ДТ, исходя из 81 заправки в сутки при объеме одной заправки 28 литров и подачи ТРК 50 л/мин:

$$P_{\text{ТРК.ЖМТ.ДТ}} = \frac{365 \text{дней} \cdot 81 \cdot 28 \cdot \left(\frac{1}{60}\right) \text{ часа}}{365 \text{дней} \cdot 50 \cdot 24 \text{часа}} =$$

$$= 0,0315 \text{год}^{-1}.$$

Вероятность присутствия автомобиля ЖМТ составит 0,5333:

– для авто с бензином АИ-95, исходя из 132 заправок в сутки при среднем времени заполнения бака не более 2 минут:

$$P_{\text{АВТО.ЖМТ.АИ-95}} =$$

$$= \frac{365 \text{дней} \cdot 132 \text{раз} \cdot \left(\frac{2}{60}\right) \text{ часа}}{365 \text{дней} \cdot 24 \text{часа}} =$$

$$= 0,18333 \text{год}^{-1};$$

– для авто с бензином АИ-92, исходя из 171 заправки в сутки при среднем времени заполнения бака не более 2 минут:

$$P_{\text{АВТО.ЖМТ.АИ-92}} =$$

$$= \frac{365 \text{дней} \cdot 171 \text{раз} \cdot \left(\frac{2}{60}\right) \text{ часа}}{365 \text{дней} \cdot 24 \text{часа}} =$$

$$= 0,23750 \text{год}^{-1};$$

– для авто с ДТ, исходя из 81 заправки в сутки при среднем времени заполнения бака не более 2 минут:

$$P_{\text{АВТО.ЖМТ.ДТ}} =$$

$$= \frac{365 \text{дней} \cdot 81 \text{раз} \cdot \left(\frac{2}{60}\right) \text{ часа}}{365 \text{дней} \cdot 24 \text{часа}} =$$

$$= 0,11250 \text{год}^{-1}.$$

Определение вероятности присутствия потребителей топлива на территории МАЗС без учета дополнительных мероприятий и производственной программы
 Вероятность нахождения людей на участке СУГ:

$$q_{\text{потребители.СУГ}} = \frac{365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа}}{365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа}} - (P_{\text{АЦ.ЖМТ.АИ-95}} + P_{\text{АЦ.ЖМТ.АИ-92}} + P_{\text{АЦ.ЖМТ.ДТ}} + P_{\text{АЦ.СУГ}}) = \\ = 1 - (0,03424 + 0,03424 + 0,03424 + 0,01815) = 0,87913.$$

Вероятность нахождения людей на участке ЖМТ с учетом производственной программы составит

$$q_{\text{потребители.ЖМТ}} = \frac{365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа}}{365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа}} - (P_{\text{АЦ.ЖМТ.АИ-95}} + P_{\text{АЦ.ЖМТ.АИ-92}} + P_{\text{АЦ.ЖМТ.ДТ}} + P_{\text{АЦ.СУГ}}) = \\ = 1 - (0,03424 + 0,03424 + 0,03424 + 0,01815) = 0,87913.$$

Вероятность присутствия людей в одноэтажном здании сервисного обслуживания водителей и пассажиров

$$q_{\text{люди.операторная.АЗС}} = \frac{365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ час}}{365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ час}} - (P_{\text{АЦТ.ЖМТ.АИ-95}} + P_{\text{АЦТ.ЖМТ.АИ-92}} + P_{\text{АЦТ.ЖМТ.ДТ}} + P_{\text{АЦТ.СУГ}}) = \\ = 1 - (0,03424 + 0,03424 + 0,03424 + 0,01815) = 0,87913.$$

Определение расчетных величин потенциального пожарного риска

Величина потенциального пожарного риска на территории объекта и в жилой зоне вблизи объекта определяется формулой [4]:

$$P_{(a)} = \sum_{j=1}^j Q_{a_i}(a) \cdot Q_j, \quad (1)$$

где j – число сценариев развития пожароопасных ситуаций (пожаров, ветвей логического дерева событий); $Q_{a_i}(a)$ – условная вероятность поражения человека в определенной точке территории (а) в результате реализации j -го сценария развития пожароопасных ситуаций, отвечающего определенному иницирующему аварии событию; Q_j – частота реализации в течение года j -го сценария развития пожароопасных ситуаций, год⁻¹.

На основании логических деревьев событий определяются вероятности реализации в течение года i -й ветви логической схемы, иницирующие пожароопасные ситуации с условной вероятностью поражения людей в соответствии с расчетными

данными, определяемыми по приложению 3 [4].

Для участка СУГ рассматриваются следующие иницирующие пожароопасные ситуации:

- горизонтальный и вертикальный факел – взрыв топливно-воздушной смеси
- пожар-вспышка при разгерметизации технологических трубопроводов;
- огненный шар – взрыв топливно-воздушной смеси – пожар-вспышка при полном разрушении модуля СУГ и газового баллона автомобиля.

Для участка ЖМТ рассматриваются следующие иницирующие пожароопасные ситуации:

- пожар пролива – пожар-вспышка
- взрыв топливно-воздушной смеси при разгерметизации технологического оборудования ЖМТ.

Потенциальный пожарный риск:

- для потребителей СУГ – $6,000 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$;
- для потребителей ЖМТ – $1,664 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$;

– для людей, находящихся в одноэтажном здании сервисного обслуживания водителей и пассажиров – $1,564 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$.

Определение расчетных величин индивидуального пожарного риска

Величина индивидуального риска $R_m(\text{год}^{-1})$ для работника m объекта при его нахождении на территории объекта определяется по формуле [4]:

$$R_m = \sum_{i=1}^I q_{im} \cdot P_{(i)}, \quad (2)$$

где q_{im} – вероятность присутствия работника m в i -й области территории объекта; $P_{(i)}$ – величина потенциального риска в i -й области территории объекта, год^{-1} .

Индивидуальный пожарный риск для потребителей топлива СУГ, на основании расчетов потенциального пожарного риска составит:

$$R_{\text{потребители.СУГ}} = q_{\text{потребители.СУГ}} \cdot P_{\text{потребители.СУГ}} = 0,87913 \cdot 6,000 \cdot 10^{-6} = 5,274 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Индивидуальный пожарный риск для потребителей топлива ЖМТ, на основании расчетов потенциального пожарного риска составит:

$$R_{\text{потребители.ЖМТ}} = q_{\text{потребители.ЖМТ}} \cdot P_{\text{потребители.ЖМТ}} = 0,87913 \cdot 1,664 \cdot 10^{-5} = 1,462 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}.$$

Индивидуальный пожарный риск для потребителей топлива АЗС, находящихся в одноэтажном здании сервисного обслуживания водителей и пассажиров, на основании расчетов потенциального пожарного риска составит:

$$R_{\text{люди.операторная.АЗС}} = q_{\text{люди.операторная.АЗС}} \cdot P_{\text{люди.операторная.АЗС}} + R_{\text{здание.при.пожаре.операторная.АЗС}} = 0,87913 \cdot 1,564 \cdot 10^{-7} + 7,308 \cdot 10^{-7} = 8,682 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}.$$

Расчет показал, что для людей, находящихся на территории МАЗС индивидуальный пожарный риск превышает допустимые значения, установленные ч. 1 с. 93 [9].

Комплекс организационно-технических мероприятий:

– применение технологической системы приема, хранения и выдачи СУГ, имеющей сертификаты Таможенного союза и/или разрешение на применение на территории Российской Федерации, выданное Ростехнадзором;

– применение АЦТ СУГ с двустенной емкостью и огнезащитой, что обеспечивает целостность защиты и ее теплоизолирующую способность в течение времени, при воздействии на нее воды во время тушения пожара, а также в течение 60 мин. огневого воздействия на нее возможного пожара;

– применение двустенного резервуара хранения СУГ с заполнением межстенного пространства инертным газом;

– применение конструктивной теплоизоляции (огнезащиты) двустенного резервуара хранения СУГ, с трубопроводной обвязкой, обеспечивающей целостность защиты и ее теплоизолирующую способность в течение времени и в условиях эксплуатации резервуара (трубопровода), при воздействии на нее воды во время тушения пожара, а также в течение 60 мин. огневого воздействия на нее возможного пожара;

– применение системы рециркуляции паров СУГ при сливе топлива из резервуаров хранения в автоцистерну;

– применение резервуара хранения СУГ с управляемыми донными клапанами от местного (на патрубках резервуара), дистанционного (из операторной) и автоматического пуска (от сигнализаторов дозрывоопасных концентраций), а также

обеспечение ввода трубопроводов для паровой и жидкой фаз СУГ в резервуар для хранения СУГ в двустенном исполнении до электромагнитных клапанов, с заполнением межстенного пространства инертным газом или вместо управляемого донного клапана должны быть предусмотрены на каждом из указанных трубопроводов дополнительные быстродействующие электромагнитные клапаны (являющиеся элементами дублирования) с временем срабатывания не более 1 с. от сигнализаторов дозрывоопасных концентраций и системы автоматической пожарной сигнализации, что обеспечивает предотвращение любой вероятной утечки СУГ из резервуара;

– применение резервуара СУГ с трубопроводной обвязкой, оборудованных электромагнитными клапанами, шаровыми кранами, предохранительными и обратными клапанами, контрольно-измерительными устройствами;

– резервуары, участки газопроводов жидкой фазы СУГ, ограниченные запорными устройствами, которые в процессе эксплуатации или действий по локализации аварии возможно перекрыть с обеих сторон оборудованы предохранительными сбросными клапанами;

– применение топливораздаточных колонок для СУГ, оборудованных разрывными муфтами и газопроводом для отвода паровой фазы;

– по предотвращению разлива СУГ в систему канализации, водопровода, очистных сооружений через колодцы (гидравлические затворы на приемных колодцах, создание уклонов и препятствий для предотвращения попадания СУГ в приемные колодцы, герметизация крышек колодцев водопровода, канализации и очистных сооружений), располагаемые на территории АЗС в радиусе 15 м от технологического участка СУГ, должны быть оборудованы двойными крышками. Пространство между крышками должно быть засыпано песком и/или другим герметизирующим материалом на высоту не менее чем 0,15 м.

Для удобства эксплуатации люков, песок (герметизирующий материал) допустимо помещать в небольшие мешки из ткани;

– применение системы контроля концентрации паров СУГ, выполненной на базе газоанализатора-сигнализатора взрывоопасных газов и паров в комплекте с конвекционными датчиками на пропан, заблокированными с насосами СУГ и ЖМТ для отключения технологических систем при достижении 10 % НКПРП, устанавливаются на расстоянии 50–100 мм от уровня площадки: у заправочных колонок СУГ и оборудования для перекачивания СУГ; на площадке у резервуаров хранения СУГ и площадки АЦТ СУГ (у разъемного соединения сливного рукава АЦ с линией наполнения резервуара);

– для предотвращения повреждения резервуара СУГ и ГЗК предусмотреть островок на высоте 200 мм от поверхности проезда с бортами (металлическими дугами) со стороны проезда;

– обозначить зоны высадки и посадки пассажиров для участка СУГ на въезде/выезде АЗС;

– запрет нахождения пассажиров и водителей в автомобиле при его заправке СУГ и ЖМТ, для предотвращения недопустимого вреда жизни и здоровью людей ввиду наличия укрытия [16] (двухэтажное здание автомойки со встроенными бытовыми помещениями) от воздействия факельного горения СУГ и пожара-вспышки;

– вменение водителям для участка СУГ не находиться возле ГЗК до момента окончательной заправки автомобиля;

– остановка утечки с применением запорной арматуры (донный клапан АЦТ ЖМТ) в течение не более 30 с от начала утечки топлива и засыпки персоналом локальных проливов сорбентами (песок и пр.) в течение не более 300 с. Толщина слоя сорбента (песок и пр.) должна обеспечивать отсутствие жидких горючих материалов на верхней границе поверхности сорбента (песок и пр.);

– остановка утечки топлива на ТРК с временем не более 60 с от начала утечки

топлива и засыпкой пролива сорбирующими веществами в течение не более 120 с от начала утечки. Толщина слоя сорбента (песок и пр.) должна обеспечивать отсутствие жидких горючих материалов на верхней границе поверхности сорбента (песок и пр.);

– тушение пожара локальных проливов жидкого горючего топлива передвижными порошковыми огнетушителями;

– реализация мероприятия по обеспечению эвакуации людей в безопасную зону (на расстоянии более 150 м от АЗС) при аварии включают оборудование территории и зданий АЗС системой оповещения путем подачи текстовых сообщений о необходимости эвакуации людей с территории и зданий АЗС, а также из зданий и территорий вблизи АЗС;

– устройство противопожарной стены 1-го типа не ближе одного метра от технологического оборудования СУГ, геометрическими параметрами (ширина и высота на 0,5 м выше резервуара).

На основании указанных организационно-технических мероприятий производится перерасчет величин пожарного риска, где не учитываются вероятности поражения людей (потребителей топлива) ОФП для расчетных сценариев по наполнению резервуаров СУГ и ЖМТ.

Определение вероятности присутствия потребителей топлива на территории МАЗС с учетом организационно-технических мероприятий и производственной программы

Вероятность нахождения людей на участке СУГ с учетом производственной программы составит:

$$q_{\text{потребители.СУГ}} = \frac{365 \text{ дней} \cdot 45 \text{ раз} \cdot \left(\frac{5}{60}\right) \text{ часа}}{365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа}} - (P_{\text{АЦ.ЖМТ.АИ-95}} + P_{\text{АЦ.ЖМТ.АИ-92}} + P_{\text{АЦ.ЖМТ.ДТ}} + P_{\text{АЦ.СУГ}}) =$$

$$= 0,15625 - (0,03424 + 0,03424 + 0,03424 + 0,01815) = 0,03538.$$

Вероятность нахождения людей на участке ЖМТ с учетом производственной программы составит

$$q_{\text{потребители.ЖМТ}} = \sum P_{\text{авто}} - (P_{\text{АЦ.ЖМТ.АИ-95}} + P_{\text{АЦ.ЖМТ.АИ-92}} + P_{\text{АЦ.ЖМТ.ДТ}} + P_{\text{АЦ.СУГ}}) =$$

$$= 0,5333 - (0,03424 + 0,03424 + 0,03424 + 0,01815) = 0,41243.$$

Вероятность присутствия людей в одноэтажном здании сервисного обслуживания водителей и пассажиров:

$$q_{\text{люди.операторная.АЗС}} = \frac{365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ час}}{365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ час}} - (P_{\text{АЦТ.ЖМТ.АИ-95}} + P_{\text{АЦТ.ЖМТ.АИ-92}} + P_{\text{АЦТ.ЖМТ.ДТ}} + P_{\text{АЦТ.СУГ}}) =$$

$$= 1 - (0,03424 + 0,03424 + 0,03424 + 0,01815) = 0,87913$$

Определение расчетных величин потенциального пожарного риска с учетом организационно-технических мероприятий и производственной программы

Потенциальный пожарный риск:

– для потребителей СУГ – $8,387 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$;

– для потребителей ЖМТ –

$8,387 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$;

– для людей, находящихся в одноэтажном здании сервисного обслуживания водителей и пассажиров, – $2,428 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$.

Определение расчетных величин индивидуального пожарного с учетом организационно-технических мероприятий и производственной программы

Индивидуальный пожарный риск для потребителей топлива СУГ на основании

$$R_{\text{потребители.СУГ}} = q_{\text{потребители.СУГ}} \cdot P_{\text{потребители.СУГ}} = 0,03538 \cdot 8,387 \cdot 10^{-8} = 2,967 \cdot 10^{-9} \text{год}^{-1}.$$

Индивидуальный пожарный риск для потребителей топлива ЖМТ на основании расчетов потенциального пожарного риска составит:

$$R_{\text{потребители.ЖМТ}} = q_{\text{потребители.ЖМТ}} \cdot P_{\text{потребители.ЖМТ}} = 0,41243 \cdot 8,387 \cdot 10^{-8} = 3,459 \cdot 10^{-8} \text{год}^{-1}.$$

Индивидуальный пожарный риск для потребителей топлива АЗС, находящихся в одноэтажном здании сервисного обслуживания водителей и пассажиров [19], на основании расчетов потенциального пожарного риска составит:

$$R_{\text{люди.операторная.АЗС}} = q_{\text{люди.операторная.АЗС}} \cdot P_{\text{люди.операторная.АЗС}} + R_{\text{здание.при.пожаре.операторная.АЗС}} = 0,87913 \cdot 2,428 \cdot 10^{-7} + 7,308 \cdot 10^{-7} = 9,442 \cdot 10^{-7} \text{год}^{-1}.$$

Расчет показал, что для людей, находящихся на территории МАЗС, индивидуальный пожарный риск не превышает допустимые значения, установленные ч. 1 ст. 93 [9] с учетом организационно-технических мероприятий и производственной программы [20].

Заключение

Проведенный анализ нормативной базы показал, что для проектирования модульной АГЗС, в том числе в составе МАЗС без разработки и согласования в установленном порядке СТУ, необходимо внесение в [3] следующих требований:

– выполнение модуля (двустенный надземный резервуар объемом не более 10 м³ с конструктивной огнезащитой, приравненный в соответствии с требованиями [3] к подземному) с трубопроводной обвязкой и ГЗК СУГ, выполненный как единое заводское изделие;

– вывод сигналов о срабатывании АПС в помещение дежурного персонала (здания операторной) и дублирование этих сигналов на пульт пожарной охраны без участия персонала объекта и (или) транслирующей этот сигнал организации в главное управление МЧС России по субъекту;

– доставку СУГ на МАЗС автоцистернами типа АЦТ-10УН или автоцистернами с аналогичными характеристиками и

расчетов потенциального пожарного риска составит:

$$R_{\text{люди.операторная.АЗС}} = q_{\text{люди.операторная.АЗС}} \cdot P_{\text{люди.операторная.АЗС}} + R_{\text{здание.при.пожаре.операторная.АЗС}} = 0,87913 \cdot 2,428 \cdot 10^{-7} + 7,308 \cdot 10^{-7} = 9,442 \cdot 10^{-7} \text{год}^{-1}.$$

системой безопасности осуществлять объемом не более 10 м³;

– обеспечить оборудование модуля СУГ управляемыми донными клапанами с местным (на патрубках резервуара), дистанционным (из операторной) и автоматическим пуском (от сигнализаторов дозрывоопасных концентраций), а также обеспечить ввод трубопроводов для паровой и жидкой фаз СУГ в модуль СУГ в двустенном исполнении до электромагнитных клапанов, с заполнением межстенного пространства инертным газом, или вместо управляемого донного клапана следует предусмотреть на каждом из указанных трубопроводов дополнительные быстродействующие электромагнитные клапаны (являющиеся элементами дублирования) с временем срабатывания не более одной секунды от сигнализаторов дозрывоопасных концентраций и системы автоматической пожарной сигнализации.

Предложенные организационно-технические мероприятия позволяют обеспечить нормативное значение расчетных величин пожарного риска для людей (потребителей топлива), находящихся на территории МАЗС. Также показано влияние на величины пожарного риска доли времени присутствия людей на участке СУГ и ЖМТ с учетом производственной программы

МАЗС, что также необходимо конкретизировать в Методике [4], так как экспертная оценка по принятию исходных данных для проведения расчетов может существенно

повлиять на результаты, обеспечивающие безопасность людей, находящихся на территории МАЗС.

Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 9.06.2020 № 1523-р «Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г.».
2. Распоряжение Правительства РФ от 13.02.2021 № 350-р «План мероприятий (“дорожная карта”) по развитию рынка малотоннажного сжиженного природного газа и газомоторного топлива в российской Федерации на период до 2025 г.».
3. Свод правил 156.13130.2014 «Станции автомобильные заправочные. Требования пожарной безопасности».
4. Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 04.07.2020 № 985 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона “Технический регламент о безопасности зданий и сооружений” и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации».
6. Приказ Росстандарта от 14.07.2020 № 1190 (ред. от 04.03.2021) «Об утверждении перечня документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
7. Федеральный закон Российской Федерации от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
8. Федеральный закон Российской Федерации от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании».
9. Федеральный Закон Российской Федерации от 22.07.2008 №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
10. Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ «О пожарной безопасности».
11. Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию».
12. Постановление Правительства РФ от 18.11.2013 № 1038 «О Министерстве строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации» (вместе с «Положением о Министерстве строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации»).
13. Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30.11.2020 № 734/пр «Об утверждении Порядка разработки и согласования специальных технических условий для разработки проектной документации на объект капитального строительства».
14. Приказ МЧС РФ от 28.11.2011 № 710 «Об утверждении Административного регламента Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий предоставления государственной услуги по согласованию специальных технических условий для объектов, в отношении которых отсутствуют требования пожарной безопасности, установленные нормативными правовыми актами Российской Федерации и нормативными документами по пожарной безопасности, отражающих специфику обеспечения их пожарной безопасности и содержащих комплекс необходимых инженерно-технических и организационных мероприятий по обеспечению их пожарной безопасности» (с изм. и доп.).
15. Постановление Правительства Москвы от 22.11.2016 № 784-ПП «Об утверждении Административного регламента предоставления государственной услуги города Москвы “Согласование специальных технических условий для подготовки проектной документации объектов капитального строительства, включая объекты метрополитена, при строительстве, реконструкции которых государственный строительный надзор осуществляется органом исполнительной власти города Москвы».
16. Постановление Правительства Российской Федерации от 22.07.2020 № 1084 «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска».
17. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска для производственных объектов». М., 2016. 265 с.
18. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». М., 2014. 226 с.

19. Шебеко Ю. Н. и др. Оценка индивидуального и социального риска аварии с пожарами и взрывами для наружных технологических установок // Пожаровзрывобезопасность. 1995. Т. 4. № 1. С. 21–29.
20. Елохин А. Н. Анализ и управление риском: теория и практика. М., 2000. 186 с.

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 9.06.2020 № 1523-r «Ob Energeticheskoy strategii RF na period do 2035 g.».
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 13.02.2021 № 350-r «Plan meropriyatij ("dorozhnaya karta") po razvitiyu rynka malotonnazhnogo szhizhennogo prirodno go gaza i gazomotornogo topliva v rossijskoj Federacii na period do 2025 g.».
3. Svod pravil 156.13130.2014 «Stancii avtomobil'nye zapravochnye. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti».
4. Prikaz MCHS Rossii ot 10.07.2009 № 404 «Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyh ob"ektah».
5. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 04.07.2020 № 985 «Ob utverzhdenii perechnya nacional'nyh standartov i svodov pravil (chastej takih standartov i svodov pravil), v rezul'tate primeneniya kotoryh na obyazatel'noj osnove obespechivaetsya soblyudenie trebovanij Federal'nogo zakona "Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij" i o priznanii utrativshimi silu nekotoryh aktov Pravitel'stva Rossijskoj Federacii».
6. Prikaz Rosstandarta ot 14.07.2020 № 1190 (red. ot 04.03.2021) «Ob utverzhdenii perechnya dokumentov v oblasti standartizacii, v rezul'tate primeneniya kotoryh na dobrovol'noj osnove obespechivaetsya soblyudenie trebovanij Federal'nogo zakona ot 22.07.2008 № 123-FZ «Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah pozharnoj bezopasnosti».
7. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 30.12.2009 № 384-FZ «Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij».
8. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 27.12.2002 № 184-FZ «O tekhnicheskome regulirovanii».
9. Federal'nyj Zakon Rossijskoj Federacii ot 22.07.2008 № 123-FZ «Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah pozharnoj bezopasnosti».
10. Federal'nyj zakon ot 21.12.1994 № 69-FZ «O pozharnoj bezopasnosti».
11. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 16.02.2008 № 87 «O sostave razdelov proektnoj dokumentacii i trebovaniyah k ih sodержaniyu».
12. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 18.11.2013 № 1038 «O Ministerstve stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii» (vmeste s «Polozheniem o Ministerstve stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii»).
13. Prikaz Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva RF ot 30.11.2020 № 734/pr «Ob utverzhdenii Poryadka razrabotki i soglasovaniya special'nyh tekhnicheskikh uslovij dlya razrabotki proektnoj dokumentacii na ob"ekt kapital'nogo stroitel'stva».
14. Prikaz MCHS RF ot 28.11.2011 № 710 «Ob utverzhdenii Administrativnogo reglamenta Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situaciyam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij predostavleniya gosudarstvennoj uslugi po soglasovaniyu special'nyh tekhnicheskikh uslovij dlya ob"ektov, v otnoshenii kotoryh otsustvuyut trebovaniya pozharnoj bezopasnosti, ustanovlennye normativnymi pravovymi aktami Rossijskoj Federacii i normativnymi dokumentami po pozharnoj bezopasnosti, otrazhayushchih specifiku obespecheniya ih pozharnoj bezopasnosti i sodержashchih kompleks neodimimyh inzhenerno-tekhnicheskikh i organizacionnyh meropriyatij po obespecheniyu ih pozharnoj bezopasnosti» (s izm. i dop.).
15. Postanovlenie Pravitel'stva Moskvy ot 22.11.2016 № 784-PP «Ob utverzhdenii Administrativnogo reglamenta predostavleniya gosudarstvennoj uslugi goroda Moskvy "Soglasovanie special'nyh tekhnicheskikh uslovij dlya podgotovki proektnoj dokumentacii ob"ektov kapital'nogo stroitel'stva, vklyuchaya ob"ekty metropolitena, pri stroitel'stve, rekonstrukcii kotoryh gosudarstvennyj stroitel'nyj nadzor osushchestvlyetsya organom ispolnitel'noj vlasti goroda Moskvy».
16. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 22.07.2020 № 1084 «O poryadke provedeniya raschetov po ocenke pozharnogo riska».
17. Posobie po primeneniyu «Metodiki opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska dlya proizvodstvennyh ob"ektov». M., 2016. 265 s.
18. Posobie po primeneniyu «Metodiki opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska v zdaniyah, sooruzheniyah i stroeniyah razlichnyh klassov funkcional'noj pozharnoj opasnosti». M., 2014. 226 s.
19. Shebeko YU. N. i dr. Ocenka individual'nogo i social'nogo riska аварии s pozharami i vzryvami dlya naruzhnyh tekhnologicheskikh ustanovok // Pozharovzryvobezopasnost'. 1995. Т. 4. № 1. С. 21–29.
20. Elohin A. N. Analiz i upravlenie riskom: teoriya i praktika. M., 2000. 186 s.

УДК 532.5: 00494

m.savin50@mail.ru

**О ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСАХ И ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ
КАВИТАЦИИ В ПРАКТИКЕ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ****ON PROBLEMATIC ISSUES AND PROSPECTS FOR THE APPLICATION
OF THE PHENOMENON OF CAVITATION IN THE PRACTICE
OF FIRE PROTECTION**

*Савин М. А., кандидат технических наук, доцент,
Курбатова Д. К.,
Уральский институт ГПС МЧС России,
Кацнельсон И. Э.,
Екатеринбург*

*Savin M., Kurbatova D.,
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Katsnelson I.,
Yekaterinburg*

В публикации приведены примеры практического применения явления кавитации в различных отраслях экономики. Констатируется, что кавитация относится к физическим явлениям, промышленное использование которых в настоящее время активно развивается, не будучи до конца исследованным. Приведены примеры конструктивно-технических решений на уровне изобретений РФ для применения кавитации в пожарной практике. На основании анализа публикаций сделан вывод о том, что изучением явления кавитации применительно к пожарно-спасательной технике в России практически никто не занимается. Намечены направления исследований и разработки новых и модернизации уже существующих узлов, оборудования и технологий за счет применения данного явления для решения актуальных задач противопожарной службы.

Ключевые слова: кавитация, кавитаторы, пожарное оборудование, пеногенератор подслоного тушения, «холодная» плазма, гидроудары, дезинтеграция, деструкция веществ, структура жидкости, эрозия, свободные радикалы, коррозия.

This publication provides examples of the practical application of the phenomenon of cavitation in various sectors of the economy. It is stated that cavitation refers to physical phenomena, the industrial use of which is currently actively developing, without being fully investigated. Examples of constructive and technical solutions at the level of inventions of the Russian Federation for the use of cavitation in fire practice are given. From the analysis of publications, it is concluded that practically no one is engaged in the study of the phenomenon of cavitation in relation to fire and rescue equipment in the Russian Federation. The directions of research and development of new and modernization of existing units, equipment and technologies through the application of this phenomenon to solve urgent problems of the fire service are outlined.

Keywords: cavitation, cavitators, fire-fighting equipment, sub-layer foam generator, "cold" plasma, water hammer (hydraulic strikes), disintegration, substance destruction, fluid structure, erosion, free radicals, corrosion.

Проблемы обеспечения должного уровня пожарной безопасности населения, объектов и территорий становятся все более актуальными и сложными.

В соответствии с ростом потенциальных и реальных опасностей для экономики страны должны возрастать, преимущественно с опережением, возможности пожарно-спасательных подразделений для того, чтобы обеспечить успешное проведение аварийно-спасательных работ, а также ликвидацию пожаров, аварий и катастроф с минимальным ущербом.

Развитие пожарно-спасательной техники и технологий неразрывно связано с общим техническим прогрессом. Причем обычно данный процесс в пожарной охране идет эволюционно. Исторически так сложилось, что в пожарном деле широко и успешно применяются идеи и технические решения из других отраслей экономики.

Все работы по совершенствованию технической составляющей противопожарной службы опираются на прочный научный фундамент, на глубокие теоретические и экспериментальные исследования, которые все шире ведутся в последнее время учеными разных специальностей.

Направления совершенствования пожарно-спасательных технологий всегда базируются на обобщении опыта эксплуатации машин и результатах специально проведенных исследований. Затем опыт тушения пожаров и эксплуатации оперативной спецтехники, как правило, отражается в уставах и наставлениях, является основой постановки последующих исследовательских задач по совершенствованию конструкции их агрегатов и узлов.

Обоснованные, разработанные и апробированные в эмпирических исследованиях технические решения обеспечат минимизацию пожарных рисков и материальных потерь от ЧС, в том числе на труднодоступных северных и арктических территориях при реализации крупных инфраструктурных и экономических проектов [1].

В данной обзорной публикации предпринята попытка определения направлений разработки новых и модернизации уже существующих узлов, оборудования и технологий за счет применения явления кавитации для решения актуальных задач противопожарной службы.

Явление кавитации впервые обнаружил английский ученый О. Рейнольдс в 1894 г. на британских миноносцах, когда флот переходил на паровую тягу.

Однако, прежде чем подступиться к данному явлению, целесообразно изложить некоторые научные данные, связанные с исследуемым вопросом [2].

Так известно, что в зависимости от внешних условий (температуры и давления) любое вещество может находиться в жидком, газообразном, твердом агрегатных состояниях, а также в виде плазмы, причем одновременно – в двух или даже трех фазах.

Плавлением называется переход вещества из твердого состояния в жидкое, *испарением* – из жидкого в газообразное, и сублимацией – из твердого в газообразное. Процессы обратной направленности соответственно называются кристаллизацией, конденсацией и десублимацией.

Пар — газообразное состояние вещества в условиях, когда газовая фаза может находиться в равновесии с жидкой или твердой фазами того же вещества, то есть при температурах ниже критической температуры вещества. Понятие «пар» практически не отличается от понятия «газ». Пар называется *насыщенным*, если он находится в термодинамическом равновесии с жидкой (или твердой) фазой того же вещества. Давление насыщенного пара является функцией температуры. Известно также, что при заданном атмосферном или ином внешнем давлении температура кипения любой жидкости постоянна, но повышается с повышением давления и понижается с его понижением. Если внешнее давление становится ниже давления насыщенного пара, то будет иметь место кипение (жидкости) или сублимация (твердого

тела); а когда оно будет выше – напротив, конденсация либо десублимация. Таким образом, при температуре 20 °С и в случае, если давление составит 17,39 мм рт. ст., т. е. станет значительно ниже атмосферного – 760 мм. рт. ст. (0,1 МПа), то вода может закипеть.

Справка. При полном испарении 1 литра воды можно получить 1244,4 литров пара. Действительно, вес одного литра пресной воды составляет 1000 г. Объем 22,4 л занимает одна грамм-молекула газа (пара). Одна молекула воды весит 18 моль

(18 г). Отсюда можно составить пропорцию: 18 г занимают объем 22,4 л, а 1000 г – соответственно X л. Отсюда $X = 1244,4$ л. или $1,2444$ м³. Таким образом, после конденсации пара его объем быстро весьма значительно уменьшается – в 1244,4 раза.

Для уяснения явления кавитации (от лат. cavitas – пустота) рассмотрим горизонтальную трубу с зауженным участком (рис. 1). Ось трубы примем за плоскость сравнения. Для сечений 1–1 и 2–2 потока жидкости уравнение Бернулли будет выглядеть следующим образом:

$$z_1 + p_1 / \rho g + \alpha v_1^2 / 2g = z_2 + p_2 / \rho g + \alpha v_2^2 / 2 + \Sigma h_{\text{ном}} = H = \text{const.}$$

Скорость жидкости в узком сечении значительно возрастает, т. е. увеличивается ее динамическое давление, и, соответственно, статическое давление p уменьшается. Если абсолютное давление p убавится до давления насыщенного пара $p_{\text{н.п.}}$, т. е. при $p = p_{\text{н.п.}}$, (рис. 1) возникает явление кавитации. Из уравнения также видно, что снижение давления может произойти и по

другим причинам, а не только при увеличении скорости движения жидкости. Например, при значительном увеличении геометрической высоты всасывания насоса, при больших потерях напора (если на трубопроводе много местных сопротивлений), что также может привести к кавитации. Справка: для воды при $t = 20$ °С величина $p_{\text{н.п.}} = 2\,400$ Па, для сравнения $p_{\text{атм}} = 101\,320$ Па.

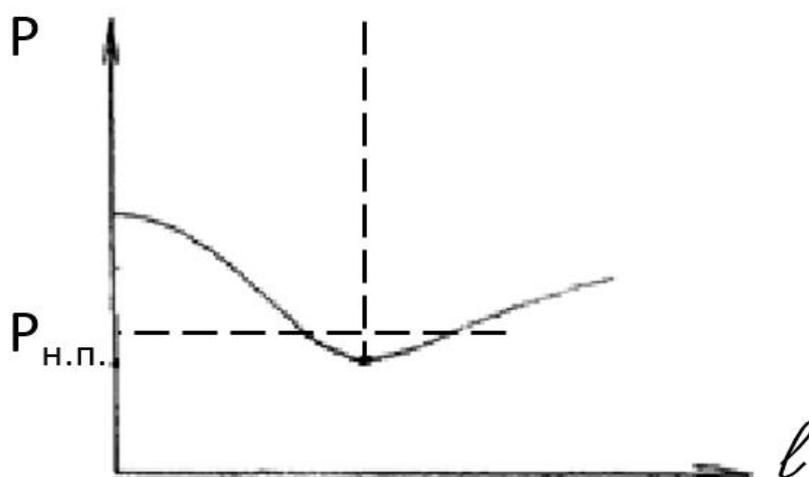
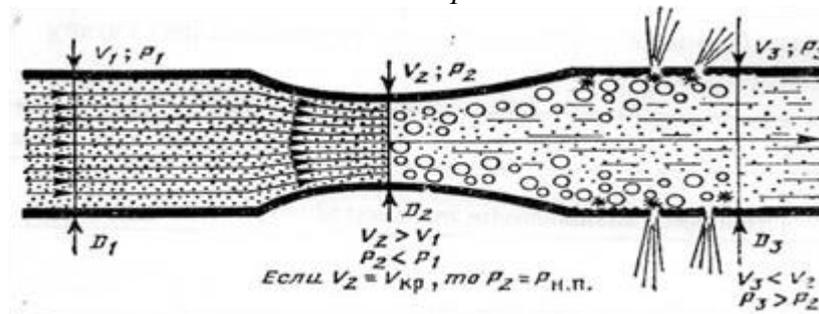


Рисунок 1. Физика явления кавитации

Итак, кавитация является сложным комплексом следующих явлений:

1) в потоке жидкости образуется значительное количество полостей, так называемых каверн или кавитационных пузырьков микроскопических размеров. В трудах И. М. Федоткина [3] показано, что радиус каверны, при гидродинамическом получении кавитации, в среднем составляет $20 \cdot 10^{-6}$ м, наполненных парами жидкости и газами, ранее растворенных в ней (из-за этого вода приобретает белесый оттенок), выделившимися из жидкости в тех областях, где местное давление равно или меньше давления ее насыщенных паров (рис. 1). Образование пузырьков внешне весьма похоже на кипение жидкости. Причем при заполнении микропузырьков газами и парами они растут. Вместе с потоком жидкости каверны перемещаются, увеличиваются в размерах, образуют крупные пузыри и полости;

2) локальное увеличение скорости потока, обусловленное заужением поперечного сечения трубы выделившимися кавернами газа или пара и хаотическое движение жидкости;

3) последующая конденсация. Попав в область повышенного давления, кавитационные микропузырьки значительно сжимаются, а далее конденсируются (схлопываются). При их коллапсе в зоне давле-

ния происходит быстрое встречное движение частиц жидкости к центру пузырька. Давление в каверне и вблизи нее достигает очень больших величин, по некоторым оценкам более 10^3 МПа. При этом также выделяется теплота и появляются связанные с нею точечные температуры в десятки тысяч Кельвинов – по сути, это «холодная» плазма. Следовательно, сконцентрированная в ничтожном объеме кинетическая энергия элементарных струек освобождается и переходит частично в тепловую энергию, а частично – в энергию сжатия. Указанный коллапс каверн приводит к генерации гидроударов с ультразвуковой частотой и, как следствие, к созданию волн сжатия и растяжения в жидкости. Таким образом, реализуются нестационарные гидромеханические процессы, которые в свою очередь, интенсифицируют тепло-массообменные процессы. И такая ударная волна в форме сферы разрушает (рис. 2) твердую поверхность – так называется кавитационная эрозия. Такие точечные высокоэнергетические импульсы могут привести к серьезным разрушениям. Следовательно, энергия конденсирующих микропузырьков реализуется в виде ударных волн, локального нагрева пара и газа, содержащихся в сжимающихся полостях, на возбуждение сонолюминесценции, на генерацию свободных радикалов, а также на создание шума;

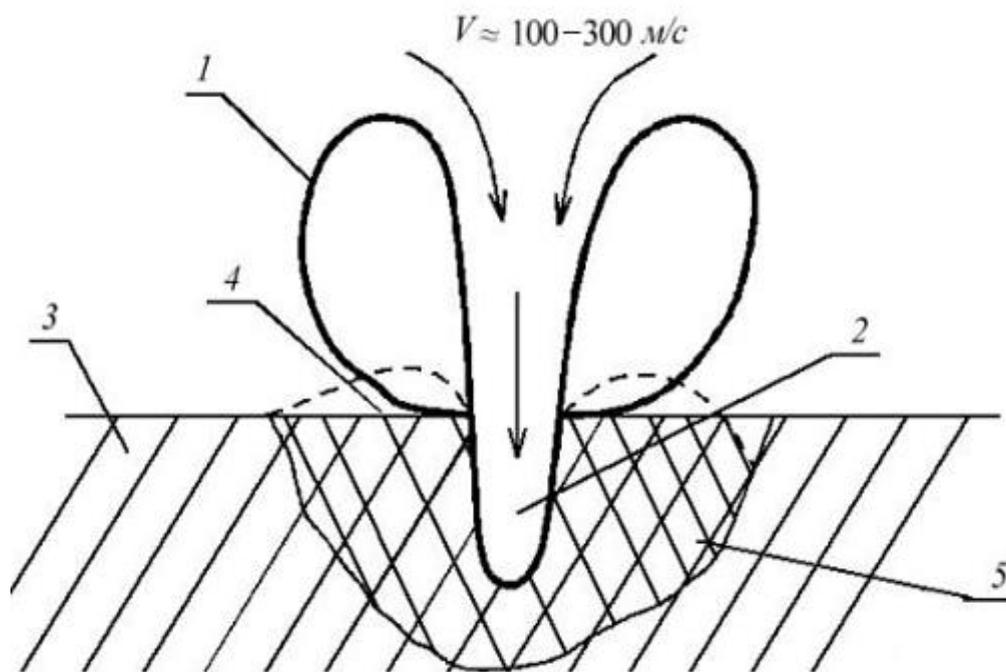


Рисунок 2. Механизм кавитационной эрозии при схлопывании каверны (весьма значительное увеличение):

1 – сферическая граница раздела паровой и жидкостной фаз; 2 – фронт потока кумулятивных микроструек; 3 – металлическая деталь; 4 – первоначальная поверхность детали; 5 – локальное разрушение детали – объем скола металла (щербина)

4) кроме того, в зоне кавитации имеет место химическое коррозионное разрушение металла кислородом воздуха, который выделился из жидкости в микропузырек при его прохождении в зонах пониженного давления [8]. Действующий одновременно с импульсными механическими воздействиями, данный комбинированный процесс понижает прочность металла деталей.

Кавитация называется гидродинамической, если снижение давления происходит по причине местного повышения скорости потока. Кавитация называется акустической, если понижение давления связано с прохождением в жидкости акустических волн большой интенсивности. Науке известны и другие причины ее возникновения.

Действительно, физическое явление кавитации успешно и эффективно применяются в самых разных отраслях экономики, инфраструктуры, военной сфере и тп. [2–15].

Так, торпеда «Шквал», двигаясь внутри кавитационного пузыря, может развивать скорость до 270 узлов (500 км/ч).

В нефтеперерабатывающем производстве: в процессах приготовления котельного и печного топлив из отходов нефтепродуктов, отработанного масла, масел и смазок, водотопливных и биотопливных эмульсий, при переработке подтоварной воды, отстоя бензо – и нефтецистерн; утилизации отходов.

При обработке топлива кавитацией имеют место снижение вязкости углеводородного топлива, а также деструкция углеводородов, т.е. рвутся длинные ассоциаты молекул, что обеспечивает увеличение дисперсности его распыления форсунками и более совершенное сгорание.

В теплоэнергетической отрасли – для нагрева и теплоносителей и воды.

В машиностроении кавитационные устройства применяются для очистки поверхностей деталей.

Кавитационные воздействия имеют значительную разрушительную силу, которую применяют для диспергирования твердых тел, находящихся в жидкости. Данный эффект используется при обработке котельного топлива для повышения тепловой способности его горения.

В строительном производстве – в приготовлении активированной водцементной суспензии при производстве бетона и пенобетона, пластификаторов, мастик, пигментов, водоэмульсионных красок и т. п.

Кавитаторы применяются в технологических процессах в нефтехимпереработке, целлюлозно-бумажной и других отраслях промышленности для приготовления рецептур композиций.

Кавитационная дезинтеграция широко реализуется при производстве хлебопродуктов, алкогольной промышленности и переработке урожая, грубых пищевых отходов, при производстве кормов и т. п.

В пищевых переделах кавитация имеет место при гомогенизации цельного молока, восстановлении сухого молока, в приготовлении обрата, йогурта, соков, сыров, мясных, рыбных, фруктовых и овощных паст и пюре, теста непосредственно из зерна и круп, при мокром помоле зерна, а также для дезинфекции воды и пищевых сред, технологии пищевых продуктов, извлечения пищевкусных веществ из сырья и т.п.

В косметике, парфюмерии и фармакологии – при приготовлении кремов, вазелина, мазей, шампуней, бальзамов, лосьонов, гелей, лекарственных форм (растворов).

А еще кавитацию применяют в электрогенерации, в технологии очистки сточных вод, в процессе бурения скважин, при крекинге углеводородов, кавитационном синтезе наночастиц углерода гидроударом и т. п.

Кавитация является гидродинамическим явлением, поскольку она основа функции гидродинамических свойств рабочих органов того или иного агрегата. Кавитация – это явление термодинамическое, т. к. она еще связана с физическими свойствами жидкости.

Кавитация вообще часто возникает в местах контакта с жидкостью быстро движущихся твердых объектов [9, 10] (турбины, рабочие колеса насосов (рис. 3), гребные винты плавсредств, подводные крылья и даже узлы ядерных реакторов). Последствия такого явления известны и могут быть самых разных масштабов – от точечной гидравлической эрозии поверхностей деталей после многих лет работы до катастрофических последствий и выхода из строя внушительных агрегатов и конструкций.



Рисунок 3. Повреждения рабочего колеса насосом наносимые эффектом кавитации

Кавитационный шум проявляется в начальной стадии кавитации в виде характерного потрескивания в зоне входа в рабочее колесо насоса.

Начальная стадия кавитации, которую называют местной кавитацией, сопровождается кавитационной эрозией, но не приводит к существенному изменению внешних параметров насоса. Стадия кавитации, соответствующая кавитационному срыву работы насоса, носит название развитой.

Необходимо отметить, что многие вопросы теории кавитации, относящиеся, например, к первичному ее зарождению, масштабному эффекту, переходу отдельных форм кавитации из одной в другую и т. п., в настоящее время разработаны недостаточно. Поэтому кавитационные свойства насосов характеризуют параметрами, соответствующими условиям их работы, предшествующим появлению развитой кавитации в проточной части.

Итак, в лопастных насосах парообразование обычно зарождается на входных частях лопаток рабочего колеса и нарушает нормальное движение жидко-

сти в рабочем колесе. Кавитационные явления особенно проявляются, когда центробежные насосы работают с существенным превышением величин напоров против номинального. В этом случае из-за градиента давлений между напорными и всасывающими полостями происходит снижение КПД по причине увеличения перетеканий и скоростей через щелевые уплотнения между рабочим колесом и корпусом. Кавитация, возникающая при такой рециркуляции внутри насоса, может привести к повреждению рабочего колеса вплоть до разрушения. Также кавитация может иметь место и в направляющем аппарате, хотя здесь она наблюдается относительно редко. Таким образом, кавитация может возникать в проточной части спецагрегата как на неподвижных, так и на подвижных его элементах.

Кроме того, из-за кавитации происходят разрушения подшипников и уплотнений. При сильной вибрации иногда случается поломка вала. Таким образом, нельзя длительное время эксплуатировать насос на данном режиме.

Отсюда, кроме факторов, зависящих от конструкции насоса, возможными

причинами появления кавитации могут быть перечисленные ниже:

- увеличение расхода насоса сверх номинального наряду с повышением угловой частоты вращения вала (ввиду возрастания скорости потока на входе в колесо и одновременного увеличения разрежения на всасывании);

- повышение гидравлического сопротивления линии всасывания (в результате монтажа дополнительной арматуры либо засорения всасывающей сетки или деформирования линии в целом – прогибы и провисания всасывающих рукавов и т. п.);

- высокая температура перекачиваемой жидкости, в т. ч. при длительной работе насоса с водой вхолостую, т. е. «на себя».

Следовательно, можно заключить, что в лопастных насосах образуются кавитационные микропузырьки, причем их тем больше, чем:

- выше угловая скорость вала (т. е. чем выше относительная скорость движения рабочего колеса и жидкой среды);

- значительнее температура жидкости;

- больше градиент давлений на выходе спецагрегата и на его входе.

Кавитацию можно идентифицировать по появлению треска и даже грохота, срыву параметров насоса: падению напора, расхода, мощности, КПД и шума, переходящего иногда в сильный.

На таких неустановившихся режимах работы спецагрегата, как гидравлический удар, режимах пуска, останова и т. п. кавитация также может иметь место.

При длительной работе насоса в условиях кавитации происходит разрушение практически любого материала, из которого выполнена обтекаемая потоком поверхность. Явления, определяющие интенсивность указанного разрушения, сложные. Главной ее причиной является механическое усталостное разрушение материала от воздействия циклов сжатия.

Скорость разрушения материалов различна. Особенно сильно явление кавитации действует на строганый чугунок, углеродистую сталь и алюминий. Наиболее устойчивы в этом отношении нержавеющая сталь и бронза.

Развитая кавитация обычно сопровождается значительным уровнем шумов и повреждением насоса и приводит к срыву его работы; средняя кавитация ведет к лишь к небольшому снижению подачи, высоты, производительности и преждевременному износу. Начальная стадия кавитации опасности не представляет, а появление значительных объемов паровых областей приводит к некоторому снижению параметров агрегата.

Науке и технике известны ряд кавитаторов, имеющих разную конструкцию и, соответственно, принципы действия [3, 7, 8]:

- ультразвуковые или магнитоотрикатели. В них кавитация генерируется под действием ультразвуковых колебаний;

- пассивные. В данных установках не предусмотрены вращающиеся части, а кавитационные эффекты реализуются посредством труб разных диаметров, сопел, перегородок, ребер, винтовых завихрителей и т. п.;

- активные. Эти устройства делятся на лопастные и гидродинамические. Первые включают статор и одно либо несколько рабочих колес. За счет вращения подвижной части установки возникает эффект кавитации. В гидродинамических установках за счет резкого изменения скорости потока образуются полости разрежения.

Ультразвуковые устройства имеют весьма высокую стоимость и небольшую производительность. Кроме того, они дороги в техническом обслуживании. Установки такого типа главным образом применяются в фармацевтической и парфюмерно-косметической промышленности.

Пассивные (статические) кавитаторы предназначены для структурных преобразований потока, для трансформации физико-химических параметров жидкости,

посредством реализации гидромеханических и массообменных процессов.

За счет интенсивного вихреобразования и кавитации пассивные (статические) кавитаторы достигают многократного преобразования эпюр скоростей, а

также изменения векторов линий тока потока и смешиваемых жидких компонентов.

Современные конструкции пассивных (статических) кавитаторов обеспечивают следующие технические характеристики и технологические возможности (табл. 1).

Таблица 1
Основные характеристики пассивных (статических) кавитаторов

Обрабатываемая (основная) жидкость	Вода, нефть, нефтепродукты, растительные масла, водные растворы кислот, щелочей и других веществ, смеси жидкостей
Плотность обрабатываемой жидкости, кг/м ³	500...1200
Кинематическая вязкость обрабатываемой жидкости, сСт	0,1...20
Массовая доля твердых частиц в обрабатываемой жидкости, %, не более	20
Размер твердых частиц, мм, не более	1
Температура обрабатываемой жидкости, °С	От –10 до +200
Давление на входе, МПа	от 0,5 до 3,2
Потери давления, МПа	0,4 ... 3,1
Условный проход входного и выходного патрубков, мм	Ду 15 ... Ду 80
Условный проход патрубка ввода дополнительных жидких компонентов, мм	Ду 10 ... Ду 25
Средний срок службы, лет	10...30

В конструкциях статических кавитаторов не закладывается требование высокой точности изготовления его элементов. Мехобработка при их изготовлении минимизирована в сравнении с роторной конструкцией. Полное отсутствие вращающихся частей не требует решения вопросов уплотнения и балансировки. Ресурс кавитатора значительно возрастает.

Достоинства пассивных (статических) кавитаторов:

- простота конструктивного исполнения;
- легкость обслуживания;
- высокая герметичность и прочность;
- работоспособность при больших давлениях и температурах, а также со взрыво-

пожароопасными и токсичными жидкими средами;

- высокая удельная производительность.

В пассивных кавитаторах обработка жидкости достигается многофакторным импульсным воздействием, а именно кавитацией, вихревым движением, разномасштабными пульсациями давления, ударными импульсами и нелинейными гидроакустическими эффектами.

В конструкциях таких кавитаторов самыми известными и широко применяемыми элементами для создания неустойчивого потока являются винтообразные элементы либо реализация тангенциального ввода жидкости в рабочую камеру (рис. 4, 5).

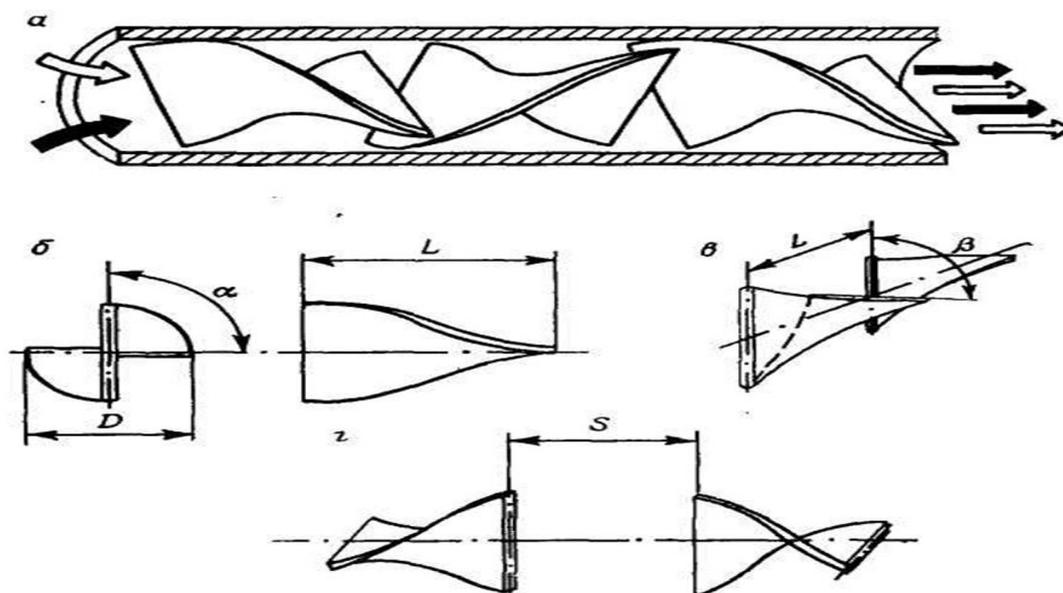


Рисунок 4. Принципиальная схема пассивного (статического) кавитатора-смесителя (а), конструкция (б) и схемы установки (в, г) смесительных элементов: D – внутренний диаметр трубы «в свету»; L – длина элемента; α – угол закрутки спирали; β – угол контакта торцовых кромок; S – зазор между смежными элементами

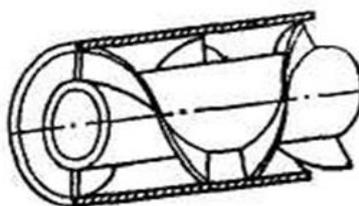


Рисунок 5. Конструктивное решение, согласно которому винтовые элементы расположены на поверхности центральной трубы либо вала кавитатора

Перегородки типа пластин со сквозным отверстием либо отверстиями являются весьма эффективными элементами статических кавитаторов. Подобная перегородка может быть дискообразной

формы, в котором имеются ряд каналов для движения потока (рис. 6). Каналы чаще всего равномерно распределены на его плоскости и могут иметь различную форму и размеры.

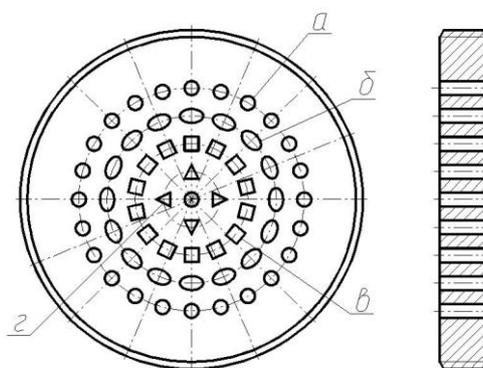


Рисунок 6. Перегородка с отверстиями различной формы поперечного сечения: а – каналы цилиндрической формы; б – каналы формы эллипса; в – каналы прямоугольной формы; г – каналы треугольной формы

После прохождения потока через отверстия в диске в жидкости возникают кавитация, турбулентность (рис. 7) и отрывные течения. Данные эффекты интенсифицируют тепло- и массообменные процессы и способствуют интенсивному дроблению ассоциатов молекул жидкости и гомогенизации.

Резкое расширение или сужение канала, влияющее на скорости потока и возникновение мощного вихреобразования, также позволяет эффективно перемешивать жидкие среды, осуществлять деструкцию веществ.

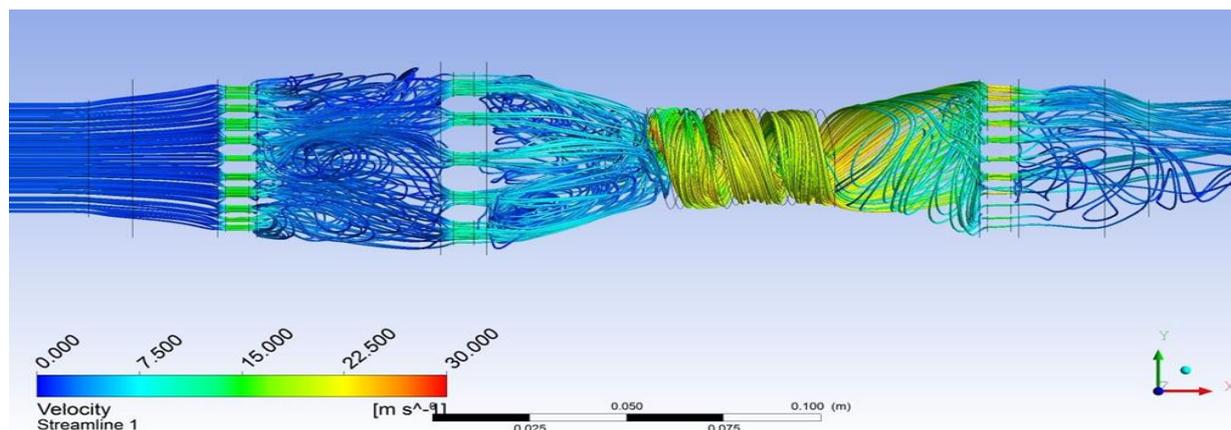


Рисунок 7. Пример линий тока жидкости для пассивного (статического) кавитатора-смесителя

Вместе с тем недостатки пассивных кавитаторов ограничивают их применение, в частности:

- практически нереально настроить параметры изделия в зависимости от плотности, вязкости и других свойств жидких продуктов;
- продолжительность технологической операции – что для получения продукции необходимого качества порой требуется несколько раз пропускать жидкость через установку;
- формирование внутренних отложений на стенках аппарата, в результате это приводит к ухудшению качества продукта.

Лопастные кавитаторы относятся к активным. У данных аппаратов рабочими органами являются колеса с лопатками определенных конструкций (рис. 8), благодаря вращению которых возникают области разрежения. Лопастные кавитаторы несколько эффективней пассивных, вместе с тем у них отмечают недостатки:

- более интенсивный износ лопастей, поскольку именно они подвержены кавитационным воздействиям;
- полости с вакуумом образуются с тыльных сторон лопаток крыльчатки.

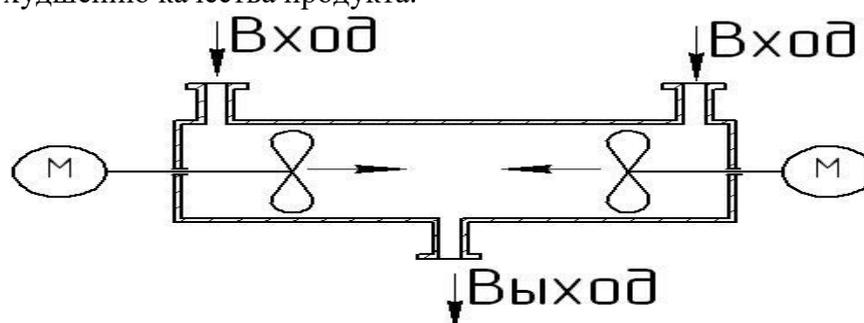


Рисунок 8. Принципиальная схема устройства лопастных кавитаторов

Гидродинамические кавитаторы включают неподвижный и подвижный корпуса (рис. 9), статор, вал, подшипники, электропривод. В статоре и роторе имеются сквозные отверстия. При вращении ротора периодически окна открываются и закрываются. При закрытии окон происходят резкие остановки потоков жидкости и возникают кавитационные эффекты. При

конденсации каверн возникают гидроудары, которые дезинтегрируют крупные молекулы и разрывают структурные связи между ними. Таким образом, в результате такой обработки изменяется структура жидкости. Кроме того, благодаря кавитации выделяются растворенные газы и протекают химические реакции, что понижает

содержание нежелательных примесей в потоке.

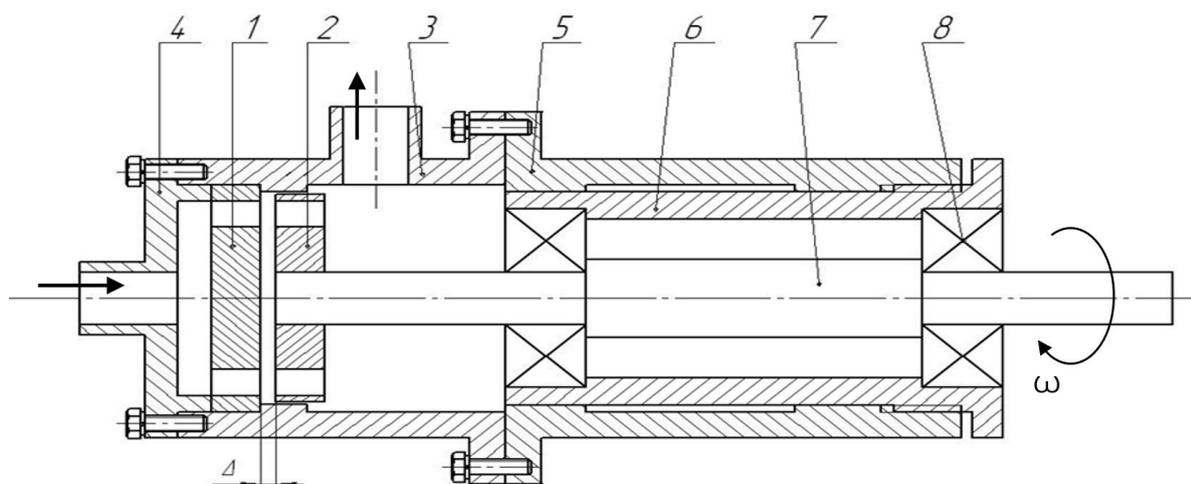


Рисунок 9. Принципиальное устройство (вариант) гидродинамического кавитатора:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – корпус излучателя; 4 – крышка корпуса; 5 – корпус неподвижный; 6 – корпус подвижный; 7 – вал; 8 – подшипник.

Гидродинамические установки имеют недостатки:

- частая замена статора и ротора, которые изнашиваются от кавитационных воздействий;
- конструктивный зазор между ротором и статором (рис. 9).

Действительно, существенным недостатком гидродинамических установок является зазор Δ между их неподвижной и вращающейся частями. Через зазор имеет место свободный ток жидкости, что приводит к ситуации, когда кавитация не проявляется во всем объеме устройства.

Изобретения и полезные модели, основанные на использовании явления кавитации и ориентированные на применение в пожарной практике укрупненном можно разделить на те, что применяются для подогрева воды либо используемые для смешения ингредиентов или для улучшения распыления огнетушащих веществ и т. п.

Так, высокоэффективным гидродинамическим кавитационным теплогенератором конструкции А. Г. Кочурова модели ВТГ-110 мощностью 110 кВт (Патент РФ № 2277681) (рис. 10, 11) оснащен пожарно-спасательный автомобиль ПСА-С-6,0-

40(6339) [14], который выпускается ОАО «Варгашинский завод ППиСО». На месте ЧС устройство используется для отопления и горячего водоснабжения отдельных объектов (учреждения здравоохранения и т. п.). Кроме того, он применяется для подпитки горячей водой рукавных линий, а также для нагрева воды в цистерне. Аналогичное предназначение имеют роторные кавитационные аппараты А. Д. Петракова (Патенты РФ № 2142604 и № 2231004).

ОАО «Варгашинский завод противопожарного и специального оборудования» также выпустил пожарную автоцистерну АЦ СОР 2,0-20/10 (43118) «Гефест», которая предназначена для тушения пожаров при крайне низких температурах окружающей среды (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Данный автомобиль оборудован двумя кавитационными теплогенераторами ВТГ-110 (рис. 11), которые приводит в действие автономный двигатель. Подогреватель обеспечивает нагрев воды в цистерне, вместимостью 2 м^3 до температуры порядка $+60\dots70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этого достаточно для обогрева рукавных линии в условиях крайне низких температур. К другим достоинствам автомобиля относится возможность энергети-

ческой установки обеспечивать работоспособность до четырех насосно-рукавных си-

стем других пожарных автомобилей, система удаления остатков воды из напорных рукавных линий и др.

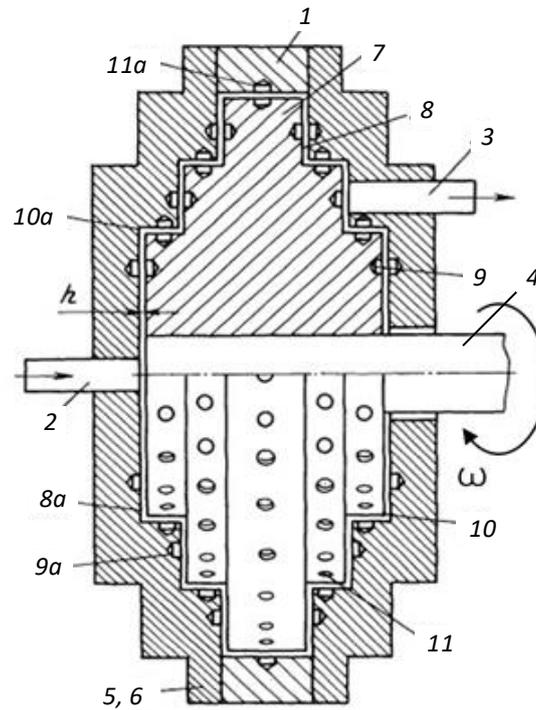


Рисунок 10. Теплопарогенератор А.Г. Кочурова (Патент РФ № 2277681):

1 – корпус; 2, 3 – патрубки входной и выходной; 4 – вал; 5, 6 – крышки; 7 – рабочий диск; 8 – площадки, 9 – выемки; 10 – торцы площадок; 11 – дополнительные выемки.

Внутренние поверхности крышек 5 и 6 повторяют форму рабочего диска 7, что предполагает наличие выемок 9а на кольцевых площадках 8а и дополнительных выемок

11а на торцах 10а. Рабочий диск 7 установлен относительно корпуса 1 и крышек 5 и 6 с зазором h.



Рисунок 11. Вихревой кавитационный теплопарогенератор ВТГ-110 с электроприводом

Известны патенты РФ (табл. 2), которые основаны на различных конструктивно-технических решениях, применение которых, по мнению авторов, обеспечит создание условий для реализации кавита-

ционных эффектов и, таким образом, позволит достичь увеличения ТТХ пожарных стволов: дальнбойности пожарных струй или получение пен высокой кратности, или увеличение факела распыла, мелкодисперсности распыливаемой жидкости и т. п.

Таблица 2

Перечень патентов РФ, направленных на повышение ТТХ пожарных стволов

Конструкции пожарных стволов на основе патентов РФ, в которых предлагается повысить их ТТХ за счет технических решений		
тангенциального подвода жидкостей и вихреобразования	применения центробежных завихрителей	ультразвука, соударения струй, вихревых эжекторов и др.
Патент 222991 РФ опубл. 10.06.2004	Патент 2264833 РФ опубл. 02.09.2004	Патент 2074544 РФ опубл. 27.02.1997
Патент 2292958 РФ опубл. 10.02.2007	Патент 2265467 РФ опубл. 10.12.2005	Патент 2153908 РФ опубл. 10.08.2000
Патент 2416446 РФ опубл. 20.04.2011	Патент 2292958 РФ опубл. 10.02.2007	Патент 2173193 РФ опубл. 10.09.2001
Патент 2419474 РФ опубл. 27.05.2011	Патент 2372122 РФ опубл. 10.11.2009	
Патент 2429918 РФ опубл. 27.09.2011	Патент 2419474 РФ опубл. 27.05.2011	
Патент 2430760 РФ опубл. 10.10.2011		
Патент 2430761 РФ опубл. 10.10.2011		
Патент 2430789 РФ опубл. 10.10.2011		

Патент 2484866 РФ опубл. 20.06.2013		
Патент 2514742 РФ опубл. 10.05.2014		

Также известен кавитационный насадок для пожарного ствола, согласно Евразийскому патенту 018125 от 30.05.2013 г. (авторы патента И. В. Карпенчук, С. Г. Петуховский, В. В. Пармон, О. В. Черневич), содержащий корпус с присоединительной резьбой для пожарного ствола, проточный кавитирующий тракт, цилиндрическую выходную часть с набором сеток, отличающийся тем, что проточный кавитирующий тракт выполнен в виде последовательно расположенных участков различной конфигурации: 1 – участка линейного сужения, характеризующегося уг-

лом конусности 15° ; 2 – участка сферического сужения; 3 – цилиндрического участка и конически расходящегося участка 4, характеризующегося углом конусности 70° , причем длина каждого из участков пропорциональна произведению соответствующего коэффициента на диаметр выходного отверстия насадка (рис. 12).

Цель изобретения – повысить качество приготовления воздушно-механической пены посредством значительного улучшения смешения воды и пенообразователя.

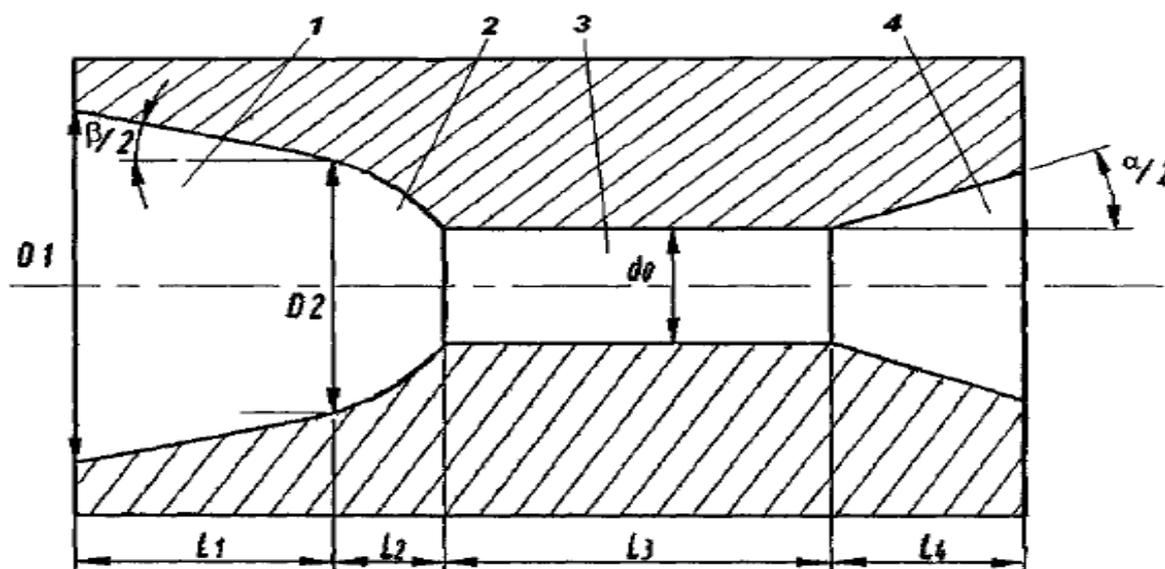


Рисунок 12. Разрез кавитационного насадка для пожарного ствола согласно Евразийскому патенту 018125

В течение последних двадцати лет теме кавитации посвящены две кандидатские диссертации, монография и несколько десятков научных статей.

Так Ю. В. Сомова в диссертации на актуальную тему [11] обосновала, разработала и исследовала эффективную, экономичную технологию обезмасливания железосодержащих шламов для обогащения на основе гидродинамической кавитации в роторно-импульсных аппаратах. Научная

новизна защищаемых в диссертации положений заключается в следующем: обосновано применение двухступенчатых роторно-импульсных аппаратов для обезмасливания шламов в условиях развитой гидродинамической кавитации. Также установлено, что подача дополнительного воздуха в зону кавитации в количестве $0,05 - \dots 0,07 \text{ м}^3/\text{м}$ интенсифицирует процесс обезмасливания шламов; эксперимен-

тально определены закономерности и параметры обезмасливания шламов в условиях гидродинамической кавитации в двухступенчатых роторно-импульсных аппаратах с содержанием нефтепродуктов до 4,0 %.

Диссертация Е. В. Бутюгиной [12] относится к фундаментальной науке. Одним из наиболее интересных эффектов, вызванных воздействием звуковой волны на жидкость, является акустическая кавитация – образование в жидкости кавитационных пузырьков. Звуковые волны в жидкости вызывают также рост, коллапс или движение таких пузырьков. Научный и практический интерес представляют изучение связанных с акустической кавитацией физических явлений, таких как сонолюминесценция (излучение пузырьком свечения во время коллапса), самоорганизация (взаимное влияние акустического поля и пузырьков), химические реакции внутри пузырька и в жидкости, самодвижение пузырька, кавитационная эрозия и многие другие. Эти явления наблюдаются в физике, химии и биологии и находят широкое практическое применение в различных областях промышленности.

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для изучения явления устойчивой акустической кавитации и связанных с ним процессов. Предложенные математические постановки и численные подходы могут быть применены также для исследования практических задач, связанных с динамикой микропузырька под действием акустического поля.

В монографии О. В. Матвиенко, Ф. Г. Унгера, В. П. Бадужева [13] рассмотрены структуры битумов и битумных дисперсных систем, пути улучшения их свойств для создания более качественных

битумных вяжущих для применения их в дорожном строительстве в различных климатических условиях. Научная новизна исследования заключается в разработке математических моделей течения закрученных потоков битумных вяжущих в трубах и каналах, возникновения кавитации, а также математических моделей модифицирования битумов и получения битумных эмульсий в кавитационно-смесительном диспергаторе. Особое внимание уделено практическому применению указанных математических моделей при создании различных кавитационно-смесительных устройств для приготовления битумных дисперсных систем.

В работе [15] рассмотрены пути повышения эффективности и надежности систем противопожарной защиты резервуаров нефти и нефтепродуктов. Установлено, что перспективным методом повышения эффективности пеногенераторов проточного типа является возбуждение гидродинамической кавитации в потоке движущейся жидкости. Приведены результаты исследований по разработке эффективных пеногенераторов пены низкой кратности, работающих в кавитационном режиме при высоких противодавлениях.

С целью теоретического исследования тока жидкого огнетушащего вещества в пеногенераторе в условиях развитой гидродинамической кавитации авторами была разработана математическая модель движения газожидкостной смеси в его диффузоре. Затем на ее основе рассчитана конструкция их опытных образцов. Пеногенератор имеет камеру для подачи воздуха в раствор пенообразователя и кавитационную струйную камеру для получения высококачественной пены низкой кратности (рис. 13).

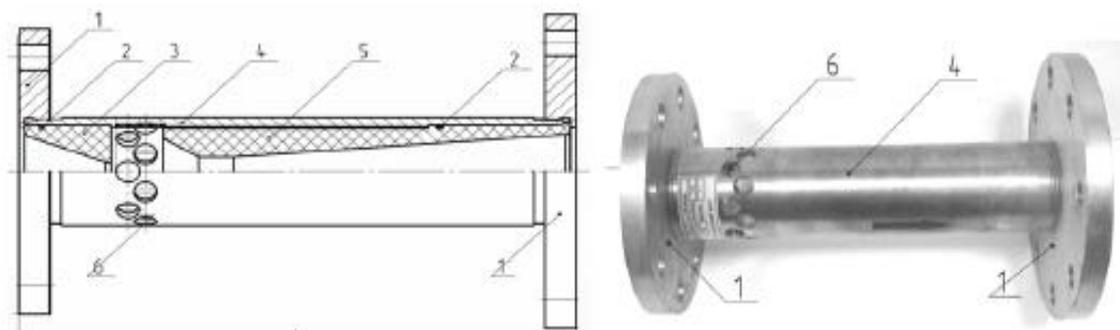


Рисунок 13. Принципиальная схема и общий вид пеногенератора:
1 – фланец; 2 – прокладка; 3 – конфузор; 4 – корпус; 5 – диффузор;
6 – отверстие для эжекции воздуха

Точность разработанной математической модели была проверена в ходе экспериментальных исследований моделей пеногенераторов.

Проведены натурные испытания по определению огнетушащей эффективности опытных образцов пеногенераторов.

Кроме того, разработана математическая модель и методика, что позволяет проектировать финишный отрезок системы подслоного пожаротушения с гидросопротивлением, обеспечивающим работу пеногенератора в режиме кавитации.

Посредством скоростной киносъемки было выявлено, что интенсивное генерирование воздушно-механической пены на выходе из аппарата обеспечивается процессом конденсации каверн по всему объему кавитационной зоны, заполняющей пространство его диффузора.

Следовательно, по критериям минимизации гидросопротивления и появления кавитации рассчитаны, разработаны, изготовлены и апробированы в реальных условиях эксплуатации конструктивно-технические решения высокоэффективного кавитационного пеногенератора, обеспечивающие следующие ТТХ: подача пенообразующего раствора – 10, 20 и 30 л/с; напор на входе порядка $(0,9 \pm 0,1)$ МПа; кратность воздушно-механической пены – не менее 4.

Из вышеизложенного можно заключить, что систематическими научными исследованиями кавитации в пожарной сфере России никто не занимается.

В настоящее время основными жидкостными огнетушащими веществами является вода и водные растворы:

- растворы пенообразователя,
- растворы солей относятся к числу жидких огнетушащих средств. Так, применяются растворы бикарбоната натрия, хлоридов кальция и аммония, глауберовой соли, аммиачно-фосфорных солей и др.

Соли, выпадая из водного раствора, образуют на поверхности горящего вещества изолирующие пленки, отнимающие теплоту. При разложении солей выделяются негорючие газы [16].

Кавитационная обработка водных растворов огнетушащих веществ позволит значительно ускорить процесс приготовления раствора, придать ему новые физические, химические и огнетушащие свойства.

Водные эмульсии и суспензии в пожаротушении практически не применяются ввиду сложности их приготовления.

Эмульсия – это дисперсная система, т.е. смесь из некоторого количества фаз (тел), не способных смешиваться, раствориться в друг друга или взаимодействовать на уровне химических процессов, а потому сохраняющихся в виде мельчайших капель. Эмульсии относятся обычно к грубодисперсным системам, поскольку капельки дисперсной фазы имеют размеры от 1 до 50 мкм.

Так, известен огнетушитель воздушно-эмульсионный закачной марки ОВЭ-2(з)-АВЕ, но в нем готовая эмульсия

огнетушащего средства ФЭМ находится под давлением в баллоне.

Суспензия — смесь жидкости и твердых частиц, равномерно распределенных в жидкости.

При приготовлении в заводских условиях суспензий и эмульсий находят применение следующие способы: смешение, размалывание в жидкой среде, раздробление с помощью ультразвука, применение кавитационных технологий.

Технологии смешения, размалывания в жидкой среде, дробления с помощью ультразвука требуют сложного оборудования и энергозатратны.

В настоящее время в промышленных масштабах при производстве эмульсий и суспензий широко применяются кавитационные технологии.

С применением кавитации имеется реальная возможность получать водные эмульсии низкокипящих жидкостей (галогидоуглеводородов, озонобезопасных хладонов, порофоров, вязких жидкостей [16] и др.).

Посредством кавитационных технологий можно также получать суспензии минеральных крошек, огнезащитных покрытий, пылей резиновой крошки и других твердых материалов.

В экстремальнонизких температурных условиях бесперебойная подача огнетушащей жидкости (воды или пенообразующего раствора) к месту работы пожарно-спасательных подразделений сопряжена со значительными трудностями. Во-первых, в связи со снижением температуры в водопроводе до $0,5 \dots 1$ °С, а в открытых водоемах, реках и озерах до $0,3$ °С, во-вторых, опасностью замерзания воды в рукавных линиях, особенно в начальный период работы насосно-рукавной системы. При низкой наружной температуре температура стенок рукавов близка к температуре окружающего воздуха и поступающая в них вода быстро охлаждается, превращаясь иногда в пастообразную ледяную массу («шугу»), которая закупоривает сначала

стволы и разветвления, а затем и рукавную линию в целом.

В результате реально возможен срыв выполнения боевой задачи. Замерзшие рукавные линии сложно разобрать, и, соответственно, убрать в скатки. Попытки загибов замерзших рукавов в ходе сворачивания сил и средств после окончания тушения пожара приводят к их механическим повреждениям (порывам).

При нагреве воды, подаваемой по пожарным рукавам в условиях низких температур, повышается надежность пожарных насосно-рукавных систем, появляется объективная возможность увеличить длины магистральных рукавных линий без перемерзания [17].

Зимой для нагрева воды в пожарных насосно-рукавных системах неплохо зарекомендовали себя вихревые кавитационные теплопарогенераторы ВТГ-110, также применяются другие гидродинамические кавитационные аппараты.

Таким образом, кавитация относится к физическим явлениям, промышленное использование которых в настоящее время активно развивается, не будучи до конца исследованным. Познание данного явления продолжает оставаться на стадии феноменологии и эмпиризма.

В настоящее время известны технические решения на уровне патентов РФ для применения кавитации в практике пожарной охраны. Также проводятся аналитические и экспериментальные исследования кавитации в самых различных сферах, кроме пожарной охраны.

Из анализа публикаций сделан вывод о том, что изучением явления кавитации применительно к пожарно-спасательной технике в РФ практически никто не занимается. Намечены направления исследований и разработок новых и модернизации уже существующих узлов, оборудования и технологий за счет применения данного явления для решения актуальных задач противопожарной службы.

Пожарная охрана будет более технологичной, если в ее арсенал поступят образцы конструктивно-технических решений, разработанные и изготовленные на базе результатов эмпирического определения наиболее эффективных и экономичных конструкций пожарного оборудования следующих поколений.

Исследование и последующее внедрение кавитационных технологий в пожарную практику позволит с минимальными

энергозатратами осуществлять подогрев воды перед подачей в рукавные линии в низкотемпературных условиях, обрабатывать огнетушащие средства с целью повышения их эффективности и экономичности, получать новые огнетушащие средства в виде эмульсий и суспензий, составы для огнезащитных покрытий, решать иные задачи.

Литература

1. Указ Президента РФ от 5.03.2020 № 164 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года».
2. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М., 1974. 348 с.
3. Федоткин И. М., Гулый И. С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов). Ч. 1. Киев, 1997. 940 с.
4. Лукашевич О. Д., Патрушев Е. И. Новые подходы к разработке технологии очистки и обеззараживания воды с применением озонирования и кавитации // Известия вузов. Строительство. 2004. № 8. С. 84–90.
5. Гогиш Л. В., Степанов Г. Ю. Отрывные и кавитационные течения. Основные свойства и расчетные модели. М., 1990. 382 с.
6. Кислов Е. А. и др. Кавитационная модель образования эмульсии в струйном аппарате // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2004. Т. 47. № 6. С. 125–127.
7. Шестаков С. Д. и др. Технология и оборудование для обработки пищевых сред с использованием кавитационной дезинтеграции. СПб., 2013. 152 с.
8. Смородов Е. А., Галияхметов Р. Н., Ильгамов М. А. Физика и химия кавитации. М., 2008. 208 с.
9. Макналти П., Пирсол И. Возникновение кавитации в насосах // Теоретические основы инженерных расчетов. 1982. № 1. С. 154–161.
10. Иваницкий Г. К., Надбайло А. Е. Аналитическое исследование кавитации в рабочем колесе центробежных насосов // Промышленная теплотехника. 2012. Т. 34. № 2. С. 40–47.
11. Сомова Ю. В. Разработка технологии обезмасливания железосодержащих шламов для обогащения на основе гидродинамической кавитации в роторно-импульсных аппаратах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2013. 21 с.
12. Бутюгина Е. В. Динамика газовых пузырьков переменной массы в жидкости под действием акустического поля: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2015. 19 с.
13. Матвиенко О. В., Унгер Ф. Г., Бадиев В. П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем. Томск, 2015. 336 с.
14. Пожарно-спасательный автомобиль исполнения ХЛ (ПСА-С) ПСА-С 6,0-40/100(6339) Модель 40BP. Руководство по эксплуатации 40BP-00-00-00PЭ. Варгаши, 2011. 40 с.
15. Пармон В. В., Карпенчук И. В., Камлюк А. Н. Кавитация в генераторах пены низкой кратности для подслоного тушения пожаров в резервуарах нефти и нефтепродуктов // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2011. № 1 (13). С. 94–104.
16. Марков В. Ф. и др. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. Екатеринбург, 2009. 274 с.
17. Алешков М. В. Повышение работоспособности напорных рукавных линий при тушении пожаров в условиях низких температур: дис. ... канд. техн. наук. М., 1990. 293 с.

References

1. Ukaz Prezidenta RF ot 5.03.2020 № 164 «Ob Osnovah gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2035 goda».
2. Knepp R., Dejli Dzh., Hemmit F. Kavitaciya. M., 1974. 348 s.
3. Fedotkin I. M., Gulyj I. S. Kavitaciya, kavitacionnaya tekhnika i tekhnologiya, ih ispol'zovanie v promyshlennosti (teoriya, raschety i konstrukcii kavitacionnyh apparatov). CH. 1. Kiev, 1997. 940 s.
4. Lukashevich O. D., Patrushev E. I. Novye podhody k razrabotke tekhnologii ochistki i obezzarazhivaniya vody s primeneniem ozonirovaniya i kavitacii // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2004. № 8. S. 84–90.

5. Gogish L. V., Stepanov G. YU. Otryvnye i kavitacionnye techeniya. Osnovnye svoystva i raschetnye modeli. M., 1990. 382 s.
6. Kislov E. A. i dr. Kavitacionnaya model' obrazovaniya emul'sii v strujnom apparate // Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2004. T. 47. № 6. S. 125–127.
7. Shestakov S. D. i dr. Tekhnologiya i oborudovanie dlya obrabotki pishchevyyh sred s ispol'zovaniem kavitacionnoj dezintegracii. SPb., 2013. 152 s.
8. Smorodov E. A., Galiahmetov R. N., Il'gamov M. A. Fizika i himiya kavitacii. M., 2008. 208 s.
9. Maknalti P., Pirsol I. Vozniknovenie kavitacii v nasosah // Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov. 1982. № 1. S. 154–161.
10. Ivanickij G. K., Nadbajlo A. E. Analiticheskoe issledovanie kavitacii v rabochem kolese centrobezhnyh nasosov // Promyshlennaya teplotekhnika. 2012. T. 34. № 2. S. 40–47.
11. Somova YU. V. Razrabotka tekhnologii obezmaslivaniya zhelezosoderzhashchih shlamov dlya obogashcheniya na osnove gidrodinamicheskoy kavitacii v rotorno-impul'snyh apparatah: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2013. 21 s.
12. Butyugina E. V. Dinamika gazovyh puzyr'kov peremennoj massy v zhidkosti pod dejstviem akusticheskogo polya: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Ufa, 2015. 19 s.
13. Matvienko O. V., Unger F. G., Baduev V. P. Matematicheskie modeli proizvodstvennyh processov dlya prigotovleniya bitumnyh dispersnyh sistem. Tomsk, 2015. 336 s.
14. Pozharno-spatatel'nyj avtomobil' ispolneniya HL (PSA-S) PSA-S 6,0-40/100(6339) Model' 40VR. Rukovodstvo po ekspluatatsii 40VR-00-00-00RE. Vargashi, 2011. 40 s.
15. Parmon V. V., Karpenchuk I. V., Kamlyuk A. N. Kavitaciya v generatorah peny nizkoj kratnosti dlya podslojnogo tusheniya pozharov v rezervuarah nefi i nefteproduktov // Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MCHS Respubliki Belarus'. 2011. № 1 (13). S. 94–104.
16. Markov V. F. i dr. Fiziko-himicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov. Ekaterinburg, 2009. 274 s.
17. Aleshkov M. V. Povyshenie rabotosposobnosti napornyh rukavnyh linij pri tushenii pozharov v usloviyah nizkikh temperatur: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 1990. 293 s.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА НАДЕЖНОСТИ
МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ****AUTOMATION OF DESIGN AND CALCULATION OF RELIABILITY
OF LIGHTNING PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES**

*Субачев С. В., кандидат технических наук, доцент,
Субачева А. А., кандидат педагогических наук, доцент,
Сафронова И. Г., кандидат педагогических наук, доцент,
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург*

*Subachev S., Subacheva A., Safronova I.,
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg*

В работе описана актуальность и показаны преимущества использования разработанного программного обеспечения для автоматизированного расчета зон защиты молниеотводов зданий и сооружений требуемой надежности в соответствии с действующими методиками, в том числе для определения зоны защиты методом фиктивной сферы. В настоящее время в России действуют несколько методик определения зон защиты молниеотводов, и при проектировании молниезащиты проектировщик может пользоваться любой из них. Использование предлагаемого программного обеспечения, во-первых, избавляет проектировщика от необходимости выполнять множество расчетов (количество которых увеличивается в квадратичной зависимости от количества молниеотводов). Во-вторых, автоматически создаваемая трехмерная модель зоны защиты позволяет на ранней стадии обнаружить ошибки, которые при традиционном проектировании молниезащиты в виде двумерных проекций могут быть не замечены проектировщиком, в работе показан такой случай. В-третьих, программа позволяет рассчитать зону защиты не только типовых комбинаций из одиночных и двойных стержневых и тросовых молниеотводов, в том числе разновысоких, описанных в действующих нормативных документах по молниезащите, но и, благодаря разработанному оригинальному алгоритму, методом «фиктивной сферы» определять зону защиты произвольной комбинации стержневых, тросовых и сетчатых молниеотводов в любом количестве.

Ключевые слова: молниезащита, молниеотвод, зона защиты, САПР, моделирование.

The paper shows the relevance and advantages of using the developed software for automated calculation of the protection zones of lightning rods of buildings and structures of the required reliability in accordance with existing methods, including for determining the protection zone using the fictitious sphere method. Currently in Russia there are several methods for determining the protection zones of lightning rods, and when designing lightning protection, the designer can use any of them. The use of the proposed software, firstly, relieves the designer of the need to perform many calculations (the number of which increases in quadratic dependence on the number of lightning rods). Secondly, the automatically created three-dimensional model of the protection zone allows at an early stage to detect errors that, in the traditional design of lightning protection in the form of two-dimensional projections, may not be noticed by the designer, such a case is shown in the paper. Thirdly, the program allows you to calculate the protection zone not only for typical combinations of single and double rod and wire lightning rods, including those of

different heights, described in the current regulatory documents on lightning protection, but also, by the developed original algorithm, to determine the zone using the «fictitious sphere» method protection of any combination of rod, wire and mesh lightning rods in any quantity.

Keywords: lightning protection, lightning rod, protection zone, CAD, modeling.

Согласно статистическим данным за предшествующие 5 лет [1], количество пожаров в Российской Федерации, возникающих вследствие грозových разрядов, неуклонно растет (рис. 1), ущерб от них превышает десятки миллионов рублей в год (рис. 2), количество жертв от этих пожаров также увеличивается (рис. 3). А в арктической зоне за период с 2010

по 2020 гг. количество зарегистрированных ударов молний возросло более чем в 8 раз [2, 3]. Это говорит о том, что обоснование и проектирование молниезащиты зданий и сооружений с требуемой надежностью – весьма актуальная задача обеспечения пожарной безопасности этих объектов, в том числе при анализе пожарных рисков на производственных объектах [4].

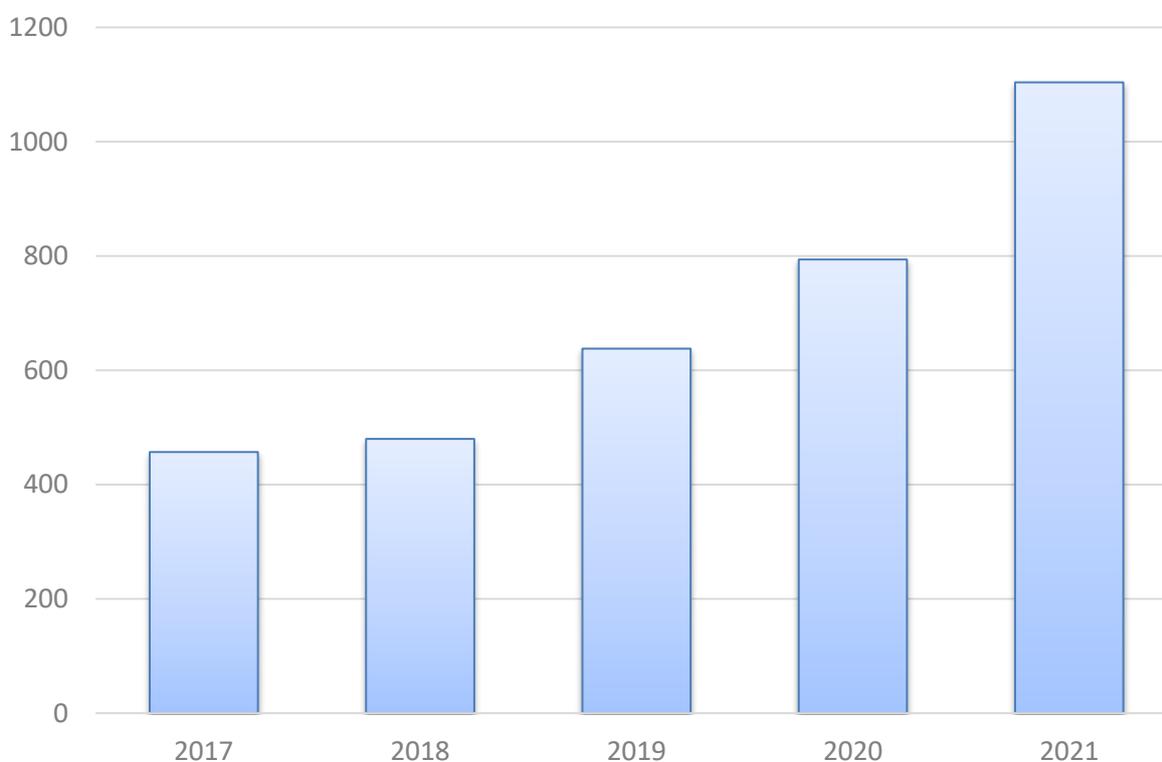


Рисунок 1. Количество пожаров вследствие грозových разрядов

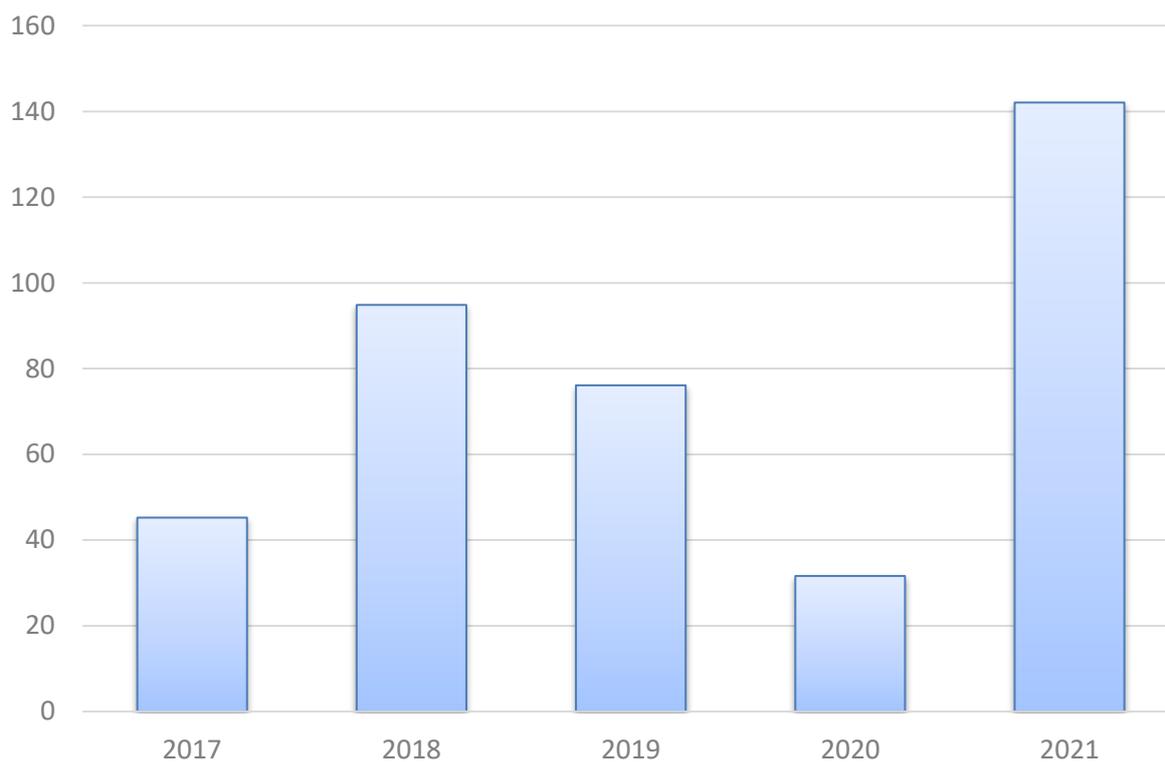


Рисунок 2. Ущерб от пожаров вследствие грозových разрядов, млн руб.

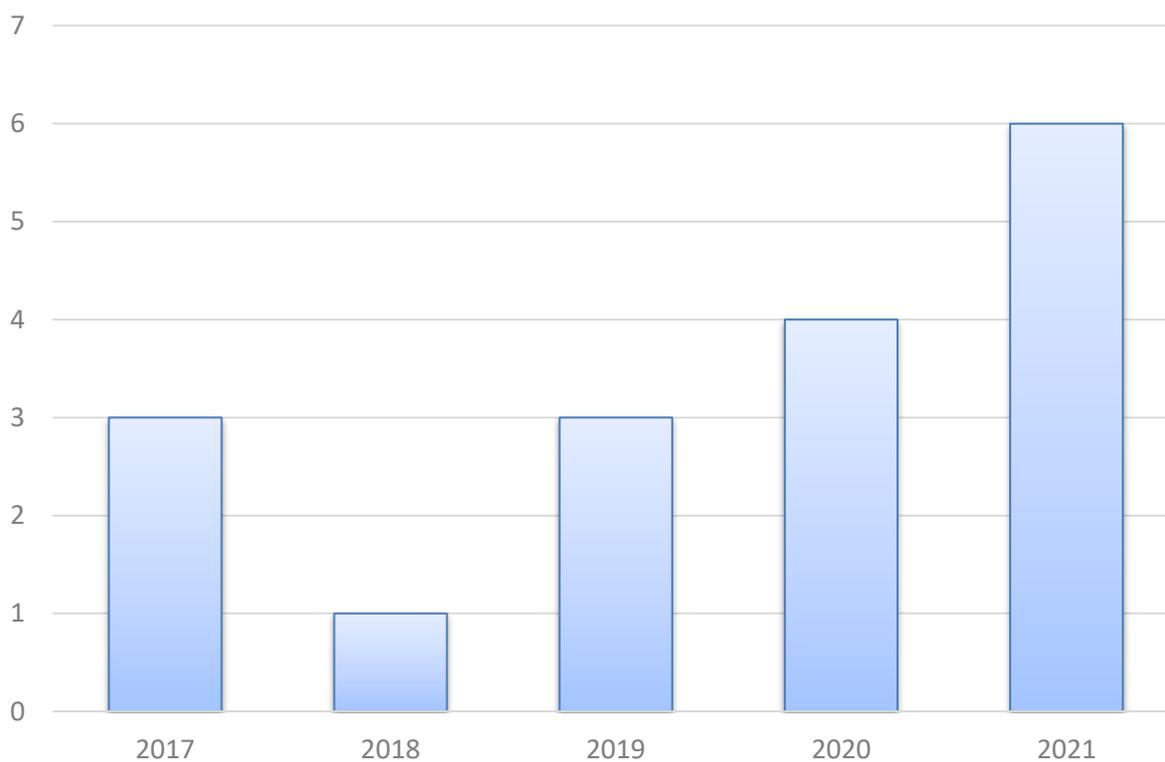


Рисунок 3. Количество погибших при пожарах, возникших вследствие грозových разрядов, чел.

В настоящее время одновременно действуют две инструкции (не считая ве-

домственных норм) по молниезащите зданий и сооружений: [5] (далее – «РД 34») и [6] (далее – «СО 153»). Причем, согласно [7], «проектные организации вправе использовать при определении исходных данных и при разработке защитных мероприятий положение любой из упомянутых инструкций или их комбинацию». Суммарно в этих инструкциях можно выделить пять основных методов для определения зон защиты молниеотводов [8–11].

Два из них – это методы, основанные на определении размеров конуса с основанием радиусом R_0 на уровне земли и высотой h_0 , и производных форм зон защиты, образуемых двойными молниеотводами (в том числе разновысокими), одиночными и двойными тросовыми молниеотводами. В РД 34 и СО 153 подходы в целом схожи, но зоны защиты различаются размерами ([5] – приложение 3 и [6] – раздел 3.3.2).

И дополнительно три метода, описанные в СО 153, заимствованные из стандарта МЭК (IEC 1024-1-1):

– метод защитного угла (для простых по форме сооружений или для маленьких частей больших сооружений);

– метод фиктивной сферы (для сооружений сложной формы);

– применение защитной сетки (метод также описан в РД 34).

Для повышения качества и эффективности проектирования защиты объектов от прямых ударов молнии в Уральском

институте ГПС МЧС России разработано программное обеспечение для автоматизации расчета зон защиты молниеотводов вышеперечисленными методами при различных уровнях надежности защиты с трехмерным отображением моделей зон защиты. Необходимость разработки этого программного обеспечения обусловлена следующими предпосылками.

Во-первых – необходимость выполнения большого количества расчетов. Как правило, при проектировании молниезащиты объектов используется не один молниеотвод очень большой высоты, а несколько молниеотводов. И для определения суммарной зоны защиты всех молниеотводов необходимо рассчитать и объединить зоны защиты всех попарно взятых двойных молниеотводов. Количество таких пар, как известно, можно оценить по формуле:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (1)$$

где C_n^k – количество сочетаний из n элементов по k ; k – количество элементов в комбинации; n – общее количество элементов.

Например, в случае четырех молниеотводов необходимо выполнить расчет шести зон защиты двойных молниеотводов (рис. 4), и при увеличении числа молниеотводов количество необходимых расчетов значительно увеличивается. Так, в случае с шестью молниеотводами таких пар будет 15, а если молниеотводов 10 – необходимо рассчитать уже 45 комбинаций.

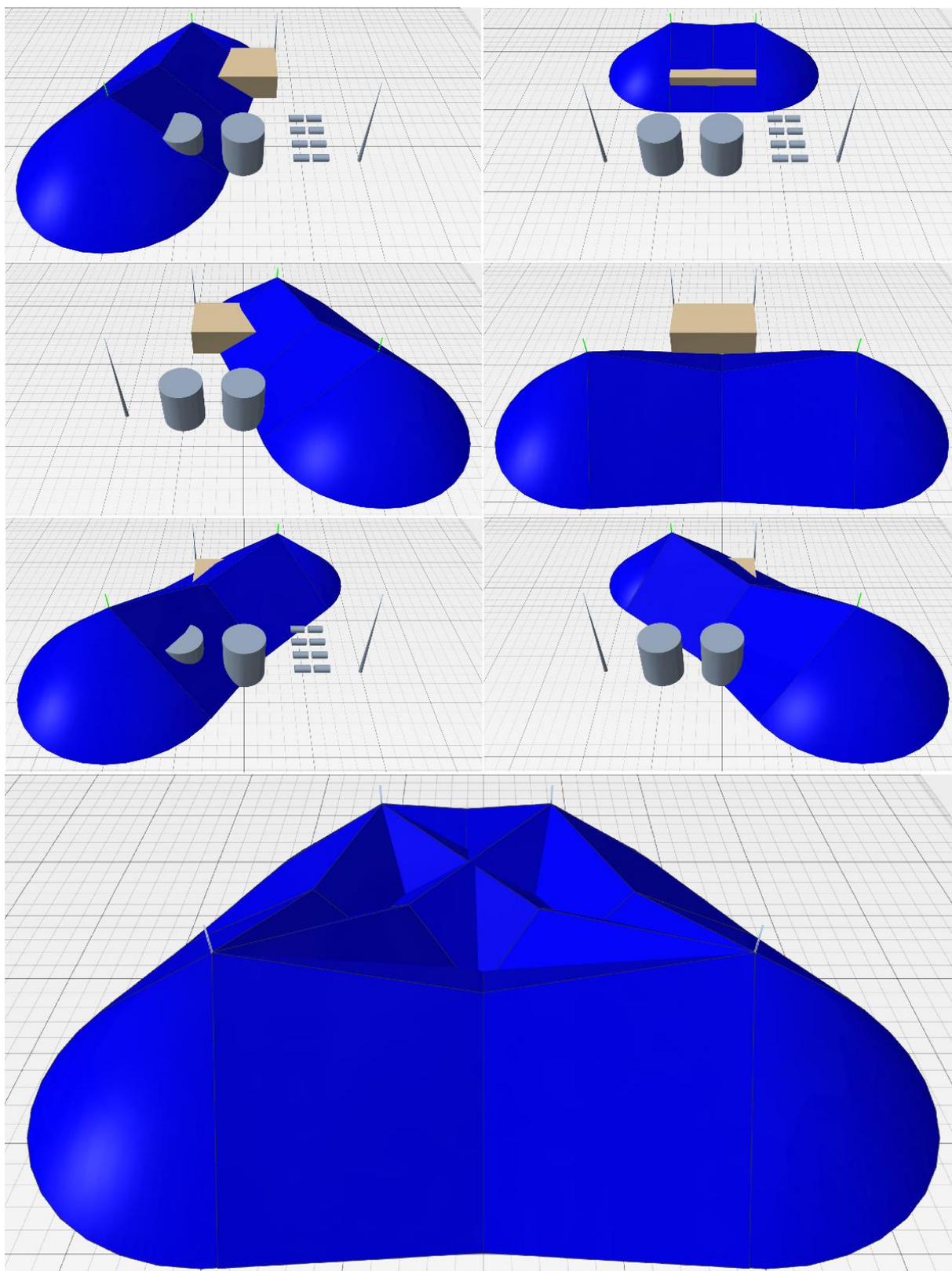


Рисунок 4. Зоны защиты двойных молниеотводов при расчете суммарной зоны защиты четырех молниеотводов

При проектировании молниезащиты простых по форме объектов, как правило, достаточно рассчитать параметры 2–

3 пар молниеотводов, чтобы определить внешние границы суммарной зоны защиты [12], но, например, на производственных объектах, где присутствуют здания неправильной формы в плане, с разновысотными частями, технологическое оборудование в форме горизонтальных и вертикальных цилиндров, наклонные протяженные объекты (технологические галереи, эстакады) и другие сооружения сложной формы, необходимо выполнить очень большое количество вычислений, чтобы убедиться, что все объекты находятся внутри зоны защиты. Кроме того, часто необходимо рассмотреть несколько различных вариантов расположения и высоты отдельных молниеотводов. Этот процесс становится весьма трудоемким, долгим, возрастает вероятность ошибок и в целом сложность проектирования. Поэтому проектировщики, так или иначе, используют в своей работе различные инструменты, позволяющие автоматизировать или упростить выполнение расчетов: номограммы с предварительно рассчитанными значениями, электронные таблицы [13] и др. При использовании же специализированного программного обеспечения расчет выполняется автоматически в течение нескольких секунд, а все внимание и работа инженера-проектировщика направлены на выбор конструкций, мест расположения и высот молниеотводов, на

поиск оптимального варианта молниезащиты, то есть на решение задач более высокого уровня, а не на машинное выполнение множества расчетов.

Во-вторых, трехмерная визуализация построенной модели зоны защиты молниеотводов возводит процесс проектирования молниезащиты на качественно иной уровень. Виртуальные модели зон защиты различных конфигураций молниеотводов уже более 15 лет применяются в образовательном процессе института [14] и неоднократно показали свою практическую ценность и эффективность, но еще более важный аспект возможности наглядного отображения результатов расчета заключается в том, что это позволяет выявить те недостатки или ошибки проектирования, которые при расчете вручную и отображении в двумерных проекциях могут остаться незамеченными проектировщиком.

В качестве примера рассмотрим расчет молниезащиты условного резервуарного парка, состоящего из трех резервуаров высотой 10,67 м, диаметром 12,33 м, расположенных на расстоянии 20 м между центрами резервуаров. Четыре стержневых молниеотвода располагаются на расстоянии 11 м по вертикали и горизонтали от центров крайних резервуаров (рис. 5).

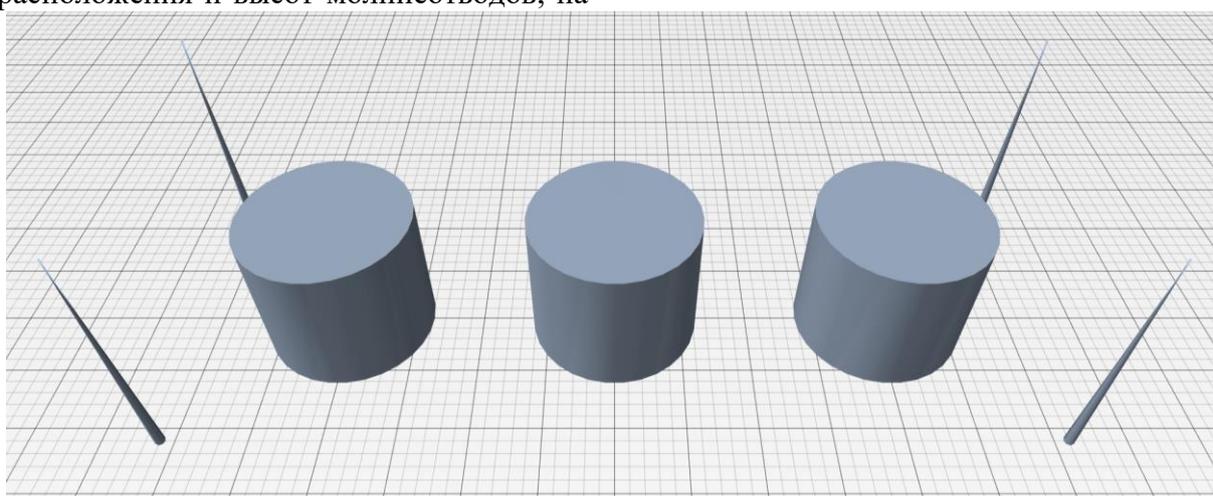


Рисунок 5. Модель резервуарного парка с молниеотводами

При «традиционном» расчете вручную с условием, что ширина зоны защиты

в центре на уровне высоты резервуаров должна быть не меньше радиуса центрального резервуара, требуемая высота молниеотводов составит 18 м, и при изображении в двумерных проекциях полученный

результат будет выглядеть весьма убедительно: визуально резервуары полностью входят в зону защиты, даже при отображении в изометрии (рис. 6).

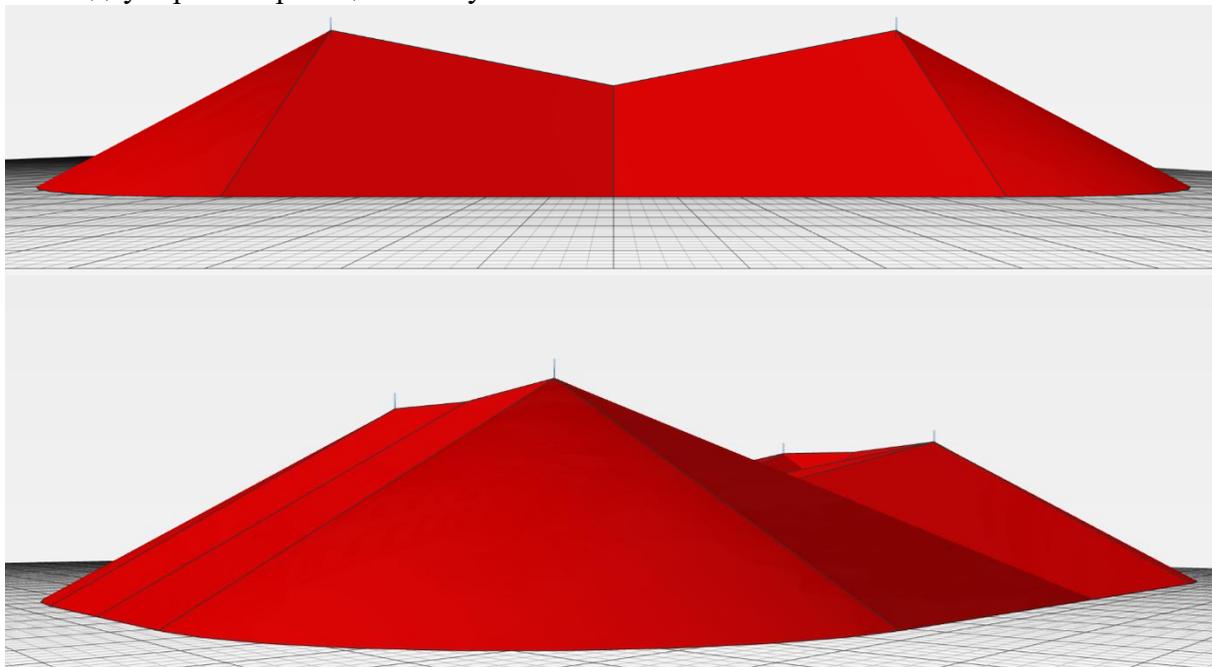


Рисунок 6. Зона защиты молниеотводов высотой 18 м

Однако при более детальном рассмотрении трехмерной модели становится видно, что центральный резервуар на самом деле не полностью входит в зону защиты (рис. 7), так как он находится между

диагонально расположенными молниеотводами, расстояние между которыми больше, чем между ортогонально расположенными, и высота зоны защиты в этом месте меньше.

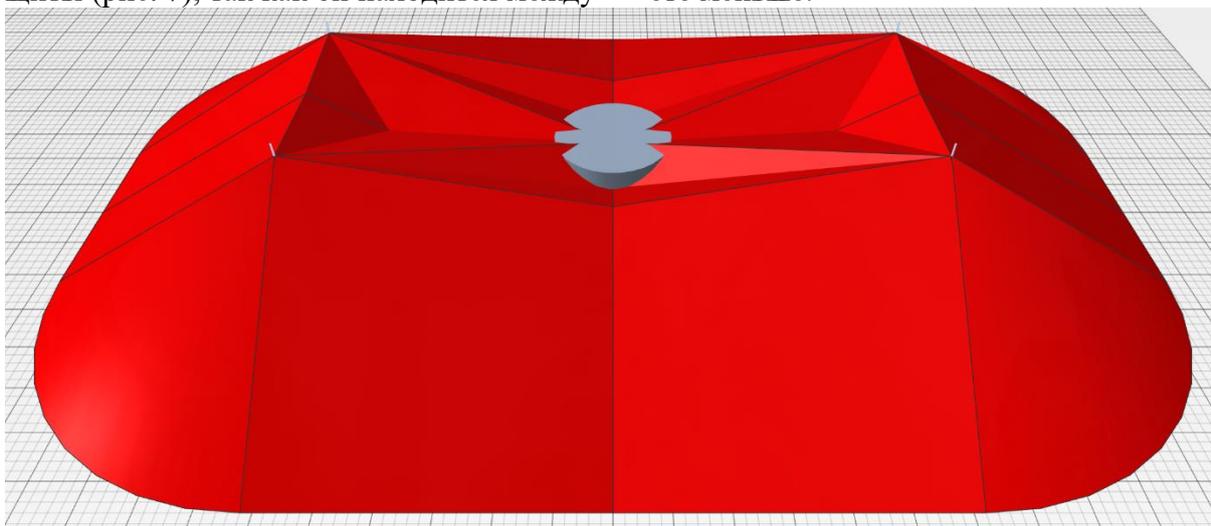


Рисунок 7. Незащищенный центральный резервуар

Конечно, это очень простой пример и, возможно, редко осуществимый на прак-

тике, но при проектировании молниезащиты сложных объектов вероятность та-

ких просчетов возрастает многократно, поэтому можно сказать, что 3D-моделирование в данном аспекте не просто визуально более наглядно, но и принципиально более функционально по сравнению с двумерными чертежами, так как позволяет выявлять подобные ошибки.

Третья задача, которая решается с помощью разработанного программного обеспечения – возможность построения зон защиты, полученных методом фиктивной сферы. Этот метод несоизмеримо более сложен в реализации по сравнению с другими, вручную выполнить все необходимые расчеты для построения зоны защиты нескольких молниеотводов практически невозможно. Способы нахождения координат центра фиктивной сферы в частных случаях (сфера касается вершин трех молниеотводов, касается двух вершин и Стержневой

опирается на третий, касается одной вершины и опирается на два других молниеотвода, касается земли и вершины молниеотвода, касается двух тросов и др.) – известны и понятны [15], но решаются в большинстве случаев только численно и требуют большого количества вычислений. Кроме того, зона защиты имеет неправильную форму, получаемую в результате булевых операций с множеством объектов в пространстве, поэтому результирующую зону защиты весьма сложно изобразить на чертежах вручную. Разработанная программа решает обе эти задачи.

По методикам РД 34 (2 уровня надежности защиты) и СО 153 (3 уровня надежности защиты) программа выполняет расчет зон защиты молниеотводов во всех комбинациях, представленных в этих инструкциях (рис. 8).

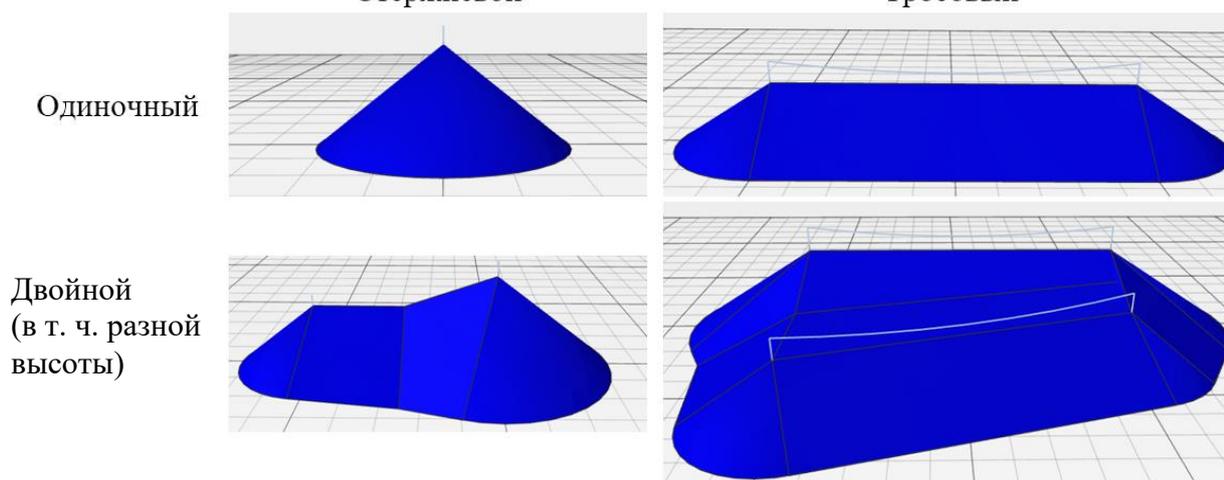


Рисунок 8. Зоны защиты различных комбинаций молниеотводов по РД 34 и СО 153

Метод фиктивной сферы более универсален и позволяет определять зону защиты произвольной совокупности молние-

отводов, в том числе с учетом зданий, защищенных сетчатыми молниеотводами (табл. 1).

Таблица 1
Возможные комбинации молниеотводов при расчете зоны защиты
методом фиктивной сферы

	Стержневой	Тросовый	Сетчатый	Пример
Один молниеотвод	1			рисунок 9
		1		рисунок 10
			1	рисунок 11
Два молниеотвода (в т. ч. разной вы- соты)	2			рисунок 12
		2		рисунок 13
			2	рисунок 14
	1	1		рисунок 15
		1	1	рисунок 16
	1		1	рисунок 17
Три и более молниеотводов	Произвольная комбинация молниеотводов			рисунок 18

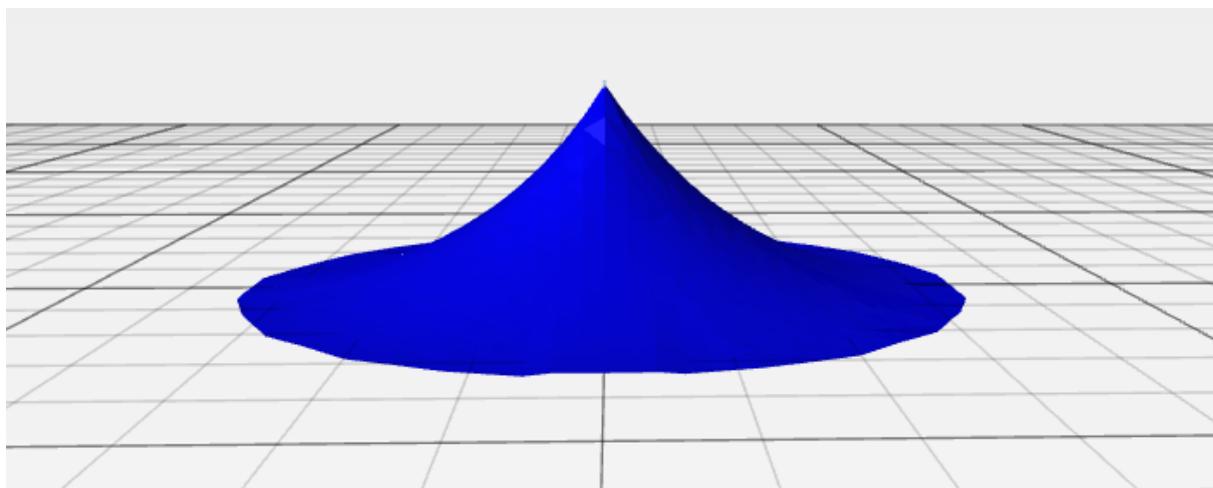


Рисунок 9. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

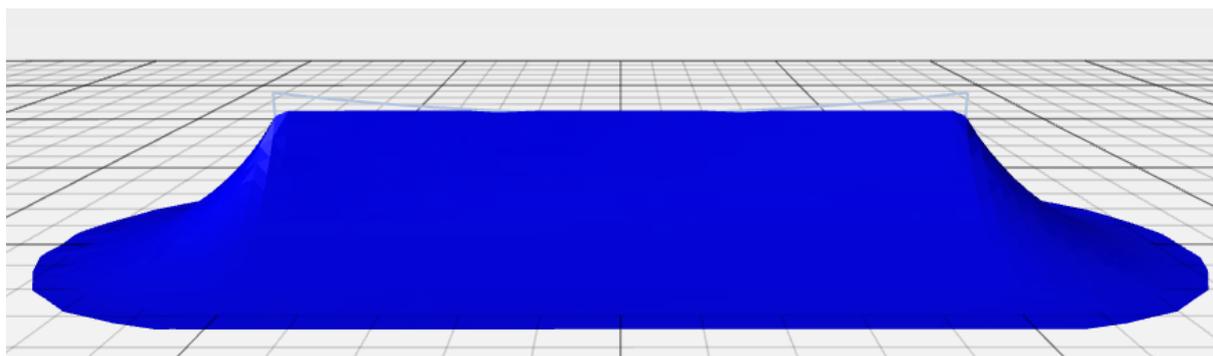


Рисунок 10. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода

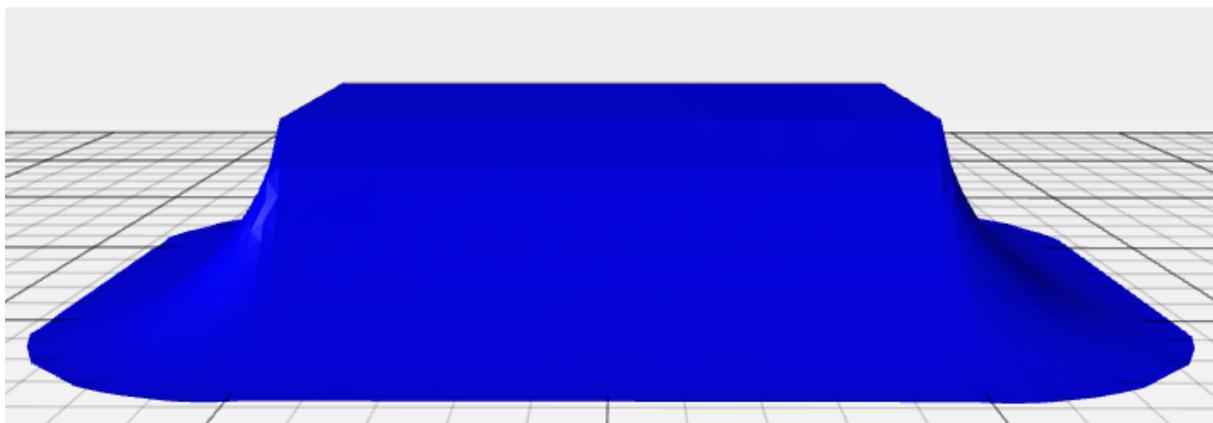


Рисунок 11. Зона защиты сетчатого молниеотвода

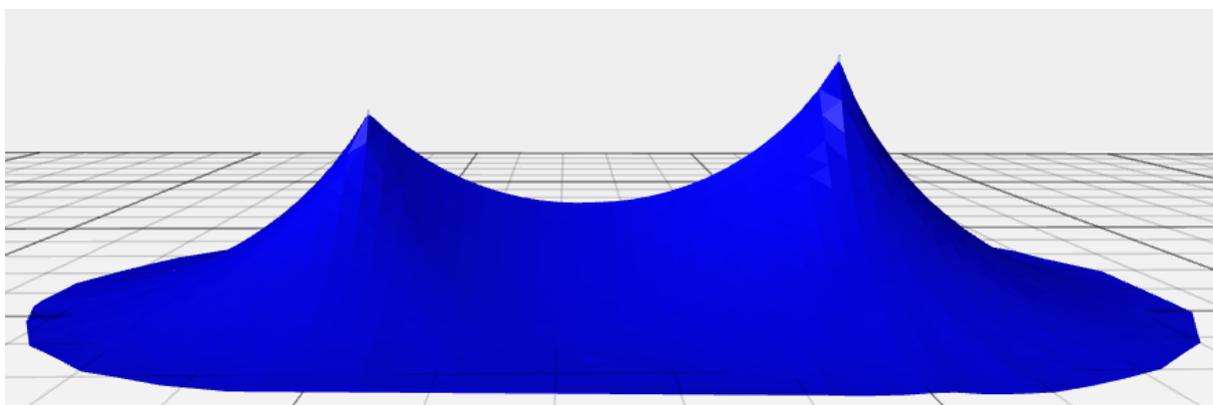


Рисунок 12. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода

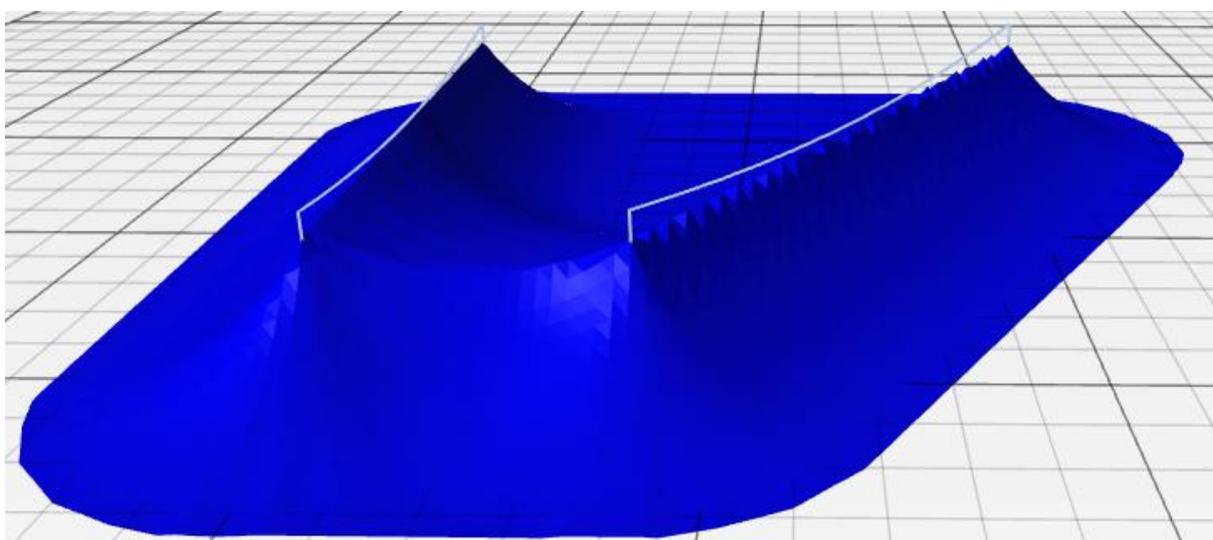


Рисунок 13. Зона защиты двойного тросового молниеотвода

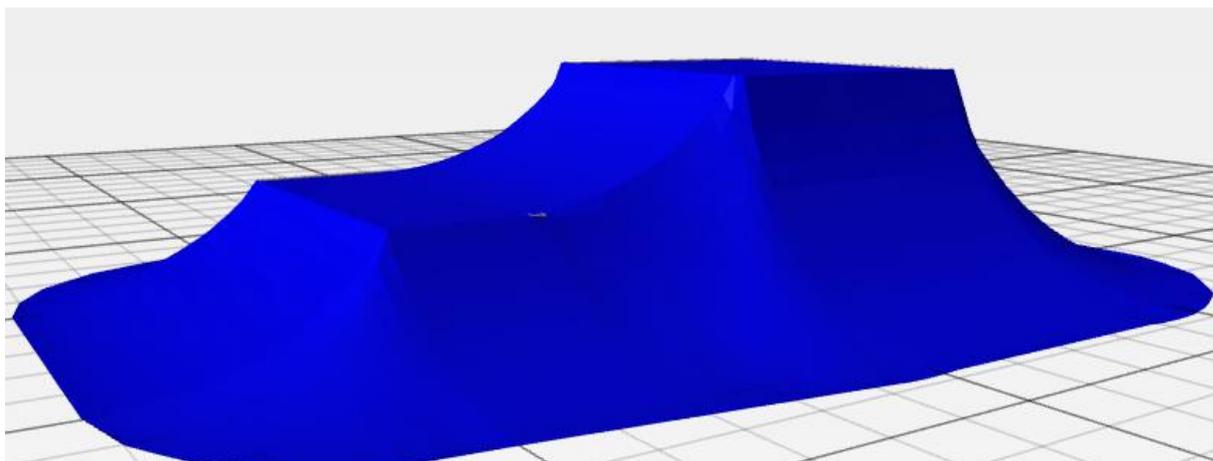


Рисунок 14. Зона защиты двух сетчатых молниеотводов



Рисунок 15. Зона защиты стержневого и тросового молниеотводов

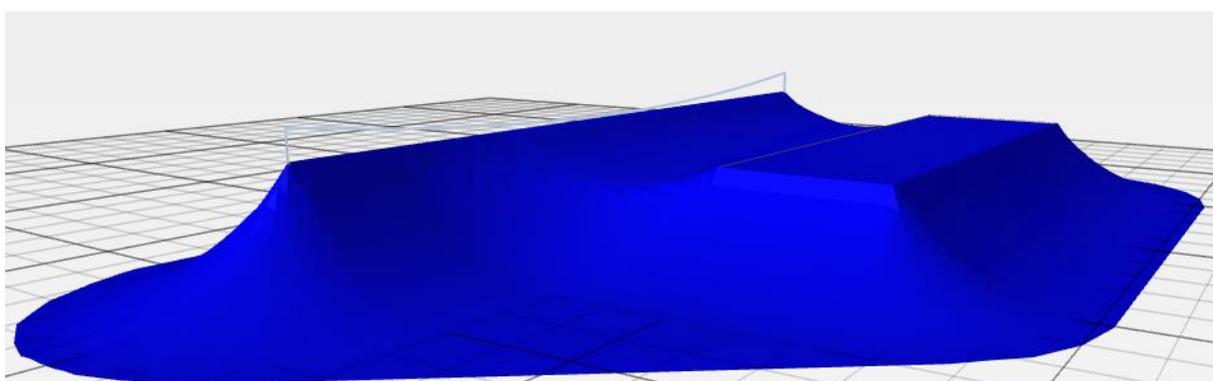


Рисунок 16. Зона защиты тросового и сетчатого молниеотводов

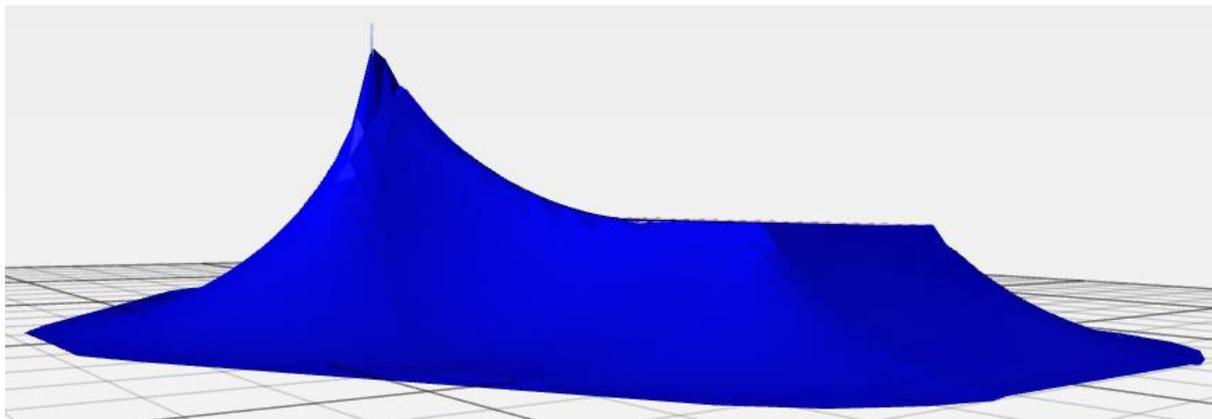


Рисунок 17. Зона защиты стержневого и сетчатого молниеотводов

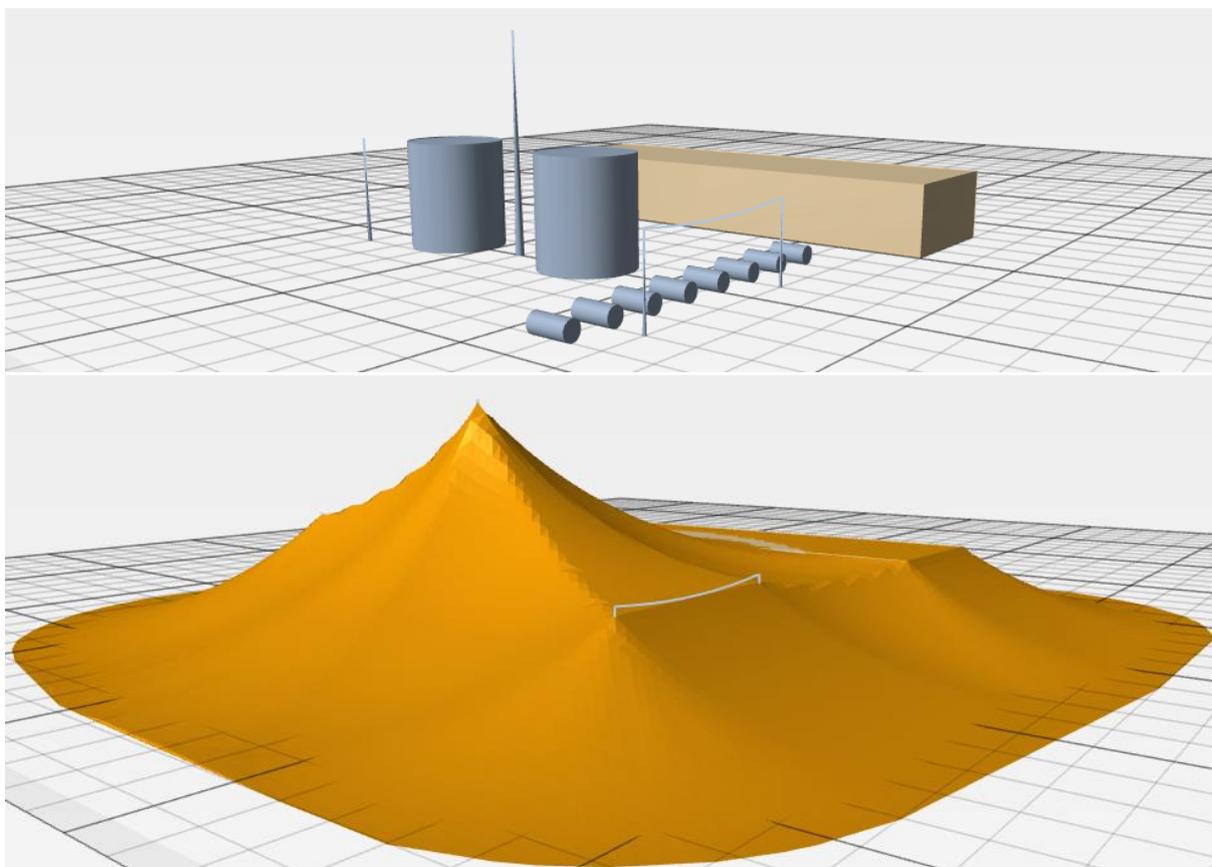


Рисунок 18. Пример зоны защиты комбинации различных типов молниеотводов

Автоматизация расчета зон защиты молниеотводов при таком широком спектре возможных комбинаций различных типов конструкций молниеотводов стала возможной благодаря разработанному оригинальному алгоритму, суть которого сводится к следующему.

1. Поочередно перебираются все молниеотводы модели (включая здания, защищенные сеткой), и находятся координаты

всех точек, удовлетворяющих условию, чтобы сфера с центром в этой точке касалась рассматриваемого молниеотвода и земли и не касалась других молниеотводов. Таким образом определяются зоны защиты одиночных молниеотводов и внешние части комбинированных (рис. 19).

2. Перебираются все попарно взятые молниеотводы модели, и находятся координаты всех точек, удовлетворяющих условию, чтобы сфера с центром в этой

точке касалась этих двух молниеотводов и не касалась других молниеотводов (рис. 20). Таким образом определяются общие части зоны защиты двойных молниеотводов и одновременно (в момент, когда сфера касается любого другого молниеотвода) – определяются координаты центра сферы, опирающейся на три точки (соприкасающейся с тремя молниеотводами).

3. Перебирается весь массив полученных координат центра сферы, определяются все точки модели с максимальной возможной координатой Z при условии, что эта точка не попадает в объем какой-либо сферы. Совокупность полученных точек составляет искомую поверхность зоны защиты всех молниеотводов (рис. 21).

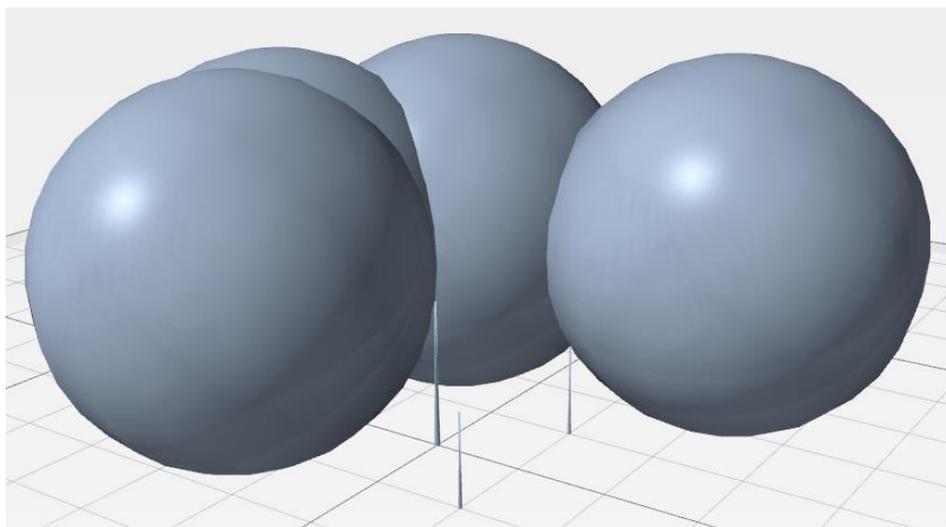


Рисунок 19. Первый этап алгоритма

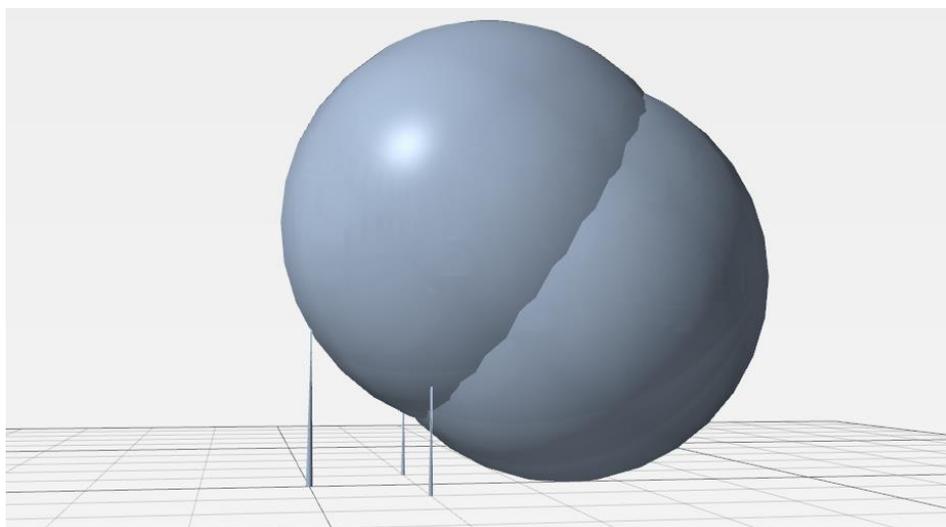


Рисунок 20. Второй этап алгоритма

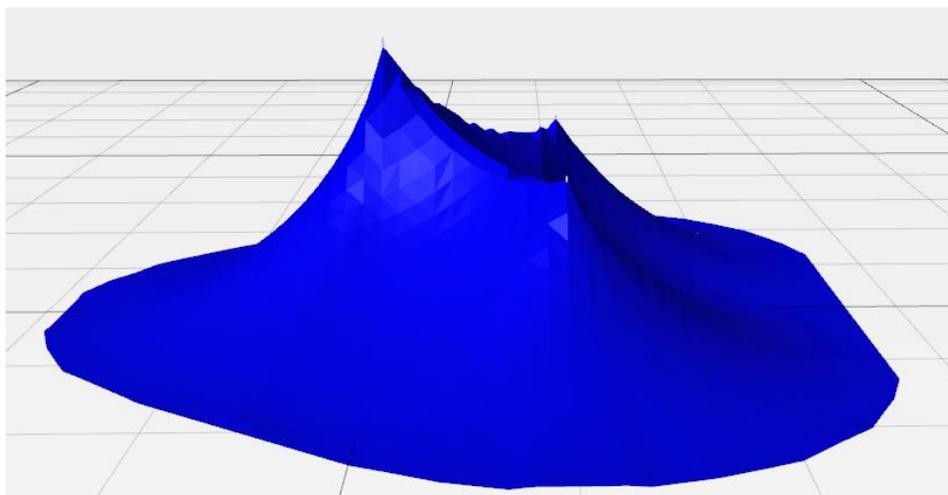


Рисунок 21. Третий этап алгоритма

При этом под условием «сфера касается молниеотвода» понимается условие, когда расстояние от центра сферы до молниеотвода равно радиусу сферы. В зависимости от относительного расположения молниеотвода и сферы это расстояние определяется по-разному. Это может быть

расстояние (рис. 22–24):

- до вершины молниеотвода;
- до отрезка – стержня или троса молниеотвода или ребра здания;
- до поверхности – крыши или стены здания, защищенного сетчатым молниеотводом.

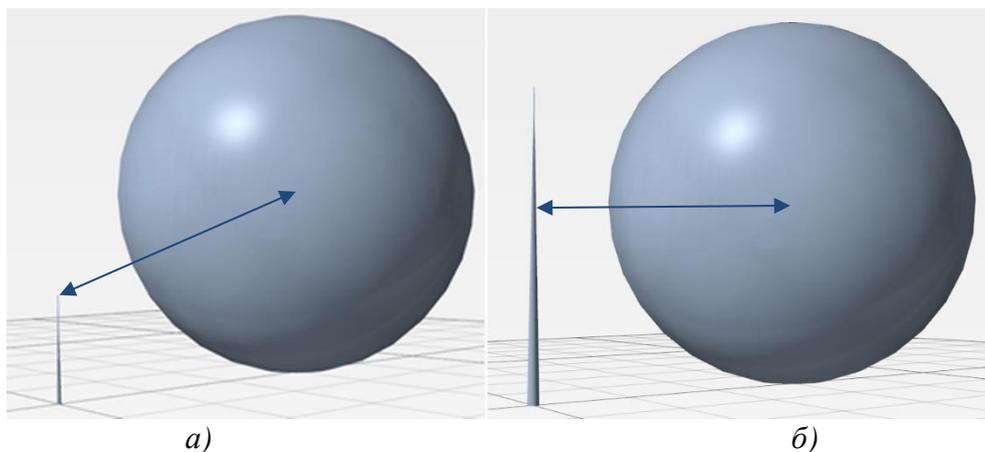


Рисунок 22. Варианты определения расстояния от центра фиктивной сферы до стержневого молниеотвода: а) до вершины молниеотвода; б) до стержня

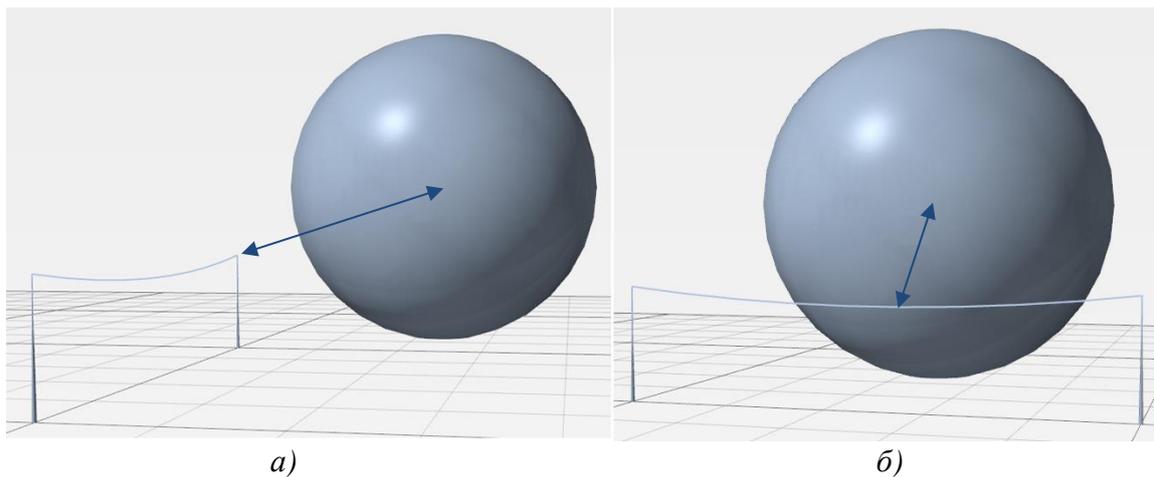


Рисунок 23. Варианты определения расстояния от центра фиктивной сферы до тросового молниеотвода: а) до вершины; б) до троса

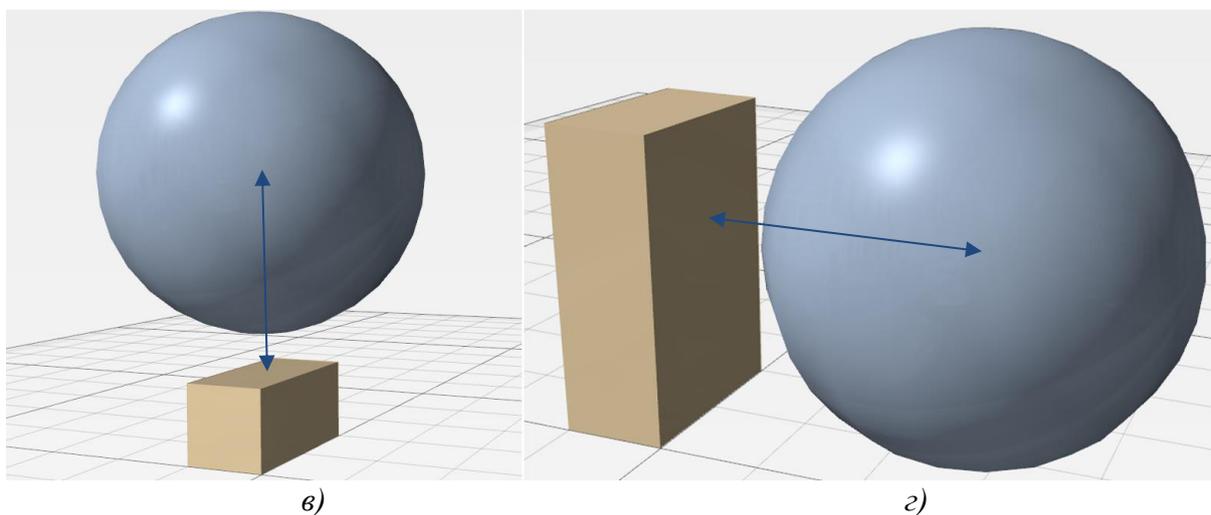
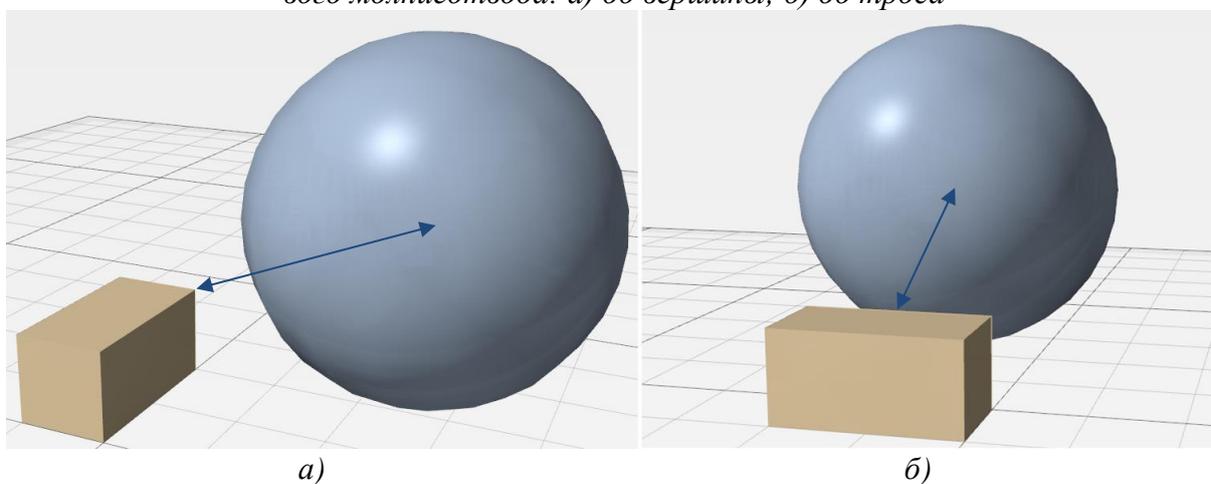


Рисунок 24. Варианты определения расстояния от центра фиктивной сферы до здания: а) до вершины; б) до ребра здания; в) до поверхности крыши; г) до поверхности стены

В настоящее время программа применяется в Уральском институте ГПС МЧС России в учебных целях: при изучении дисциплины «Пожарная безопасность

электроустановок», выполнении расчетно-графических и выпускных квалификационных работ. После апробации в образовательном процессе возможно применение в

проектной деятельности, работе надзорных органов и экспертных организаций.

Литература

1. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: стат. сб. Балашиха, 2022. 114 с.
2. В Арктике количество гроз увеличивается с угрожающей скоростью // Сетевое издание «Новая Наука». URL: <https://new-science.ru/v-arktike-kolichestvo-groz-uvlichivaetsya-s-ugrozhajushhej-skorostju> (дата обращения: 07.10.2022).
3. Holzworth R. H. et al. Lightning in the Arctic // Geophysical Research Letters. 2021. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2020GL091366> (дата обращения: 07.10.2022).
4. Марков А. Г. и др. Молниезащита и защита от статического электричества в методике определения величин пожарного риска на производственных объектах // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов : Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны, Иваново. 2022. С. 229–234.
5. РД 34.21.122–87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений.
6. СО 153-34.21.122–2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: утв. приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 280.
7. Письмо управления по надзору в электроэнергетике федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 01.12.2004 № 10-03-04/182.
8. Воронин С. В. Сравнительный анализ требований нормативных документов РД 34.21.122-87 и СО 153-34.21.122-2003 по молниезащите зданий и сооружений // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2018. № 3 (27). С. 22–26.
9. Ходак А. В. и др. Общая оценка методов построения зон защиты стержневых молниеприемников // Моя профессиональная карьера. 2021. Т. 1. № 26. С. 199–205.
10. Ходак А. В. и др. Сравнительный анализ зон защиты одиночных стержневых молниеприемников // Моя профессиональная карьера. 2021. Т. 1. № 26. С. 206–212.
11. Харламенков А. С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 6. С. 89–91.
12. Рец В. В., Никифоров А. И., Ярош А. С. Проектирование молниезащиты объектов электроэнергетики // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие»: Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие». 2021. С. 45–49.
13. Котелевская Е. А. и др. Проектирование молниезащитных устройств для животноводческих помещений // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 178. С. 108–118.
14. Субачев С. В. Применение виртуальных компьютерных моделей в практике преподавания специальных дисциплин // Применение современных форм и методов обучения в образовательном процессе Уральского института ГПС МЧС России: обзор передового педагогического опыта. 2006. С. 32–36.
15. Зубов К. Н. Совершенствование расчетных методов молниезащиты и заземляющих устройств в неоднородных грунтах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Липецк, 2011. 16 с.

References

1. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2021 godu: stat. sb. Balashiha, 2022. 114 s.
2. V Arktike kolichestvo groz uvlichivaetsya s ugrozhayushchej skorost'yu // Setevoe izdanie «Novaya Nauka». URL: <https://new-science.ru/v-arktike-kolichestvo-groz-uvlichivaetsya-s-ugrozhajushhej-skorostju> (data obrashcheniya: 07.10.2022).
3. Holzworth R. H. et al. Lightning in the Arctic // Geophysical Research Letters. 2021. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2020GL091366> (data obrashcheniya: 07.10.2022).
4. Markov A. G. i dr. Molniezashchita i zashchita ot staticheskogo elektrichestva v metodike opredeleniya velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyh ob"ektah // Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya inzhenernyh sistem obespecheniya pozharnoj bezopasnosti ob"ektov : Sbornik materialov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 90-letiyu obrazovaniya grazhdanskoj oborony, Ivanovo. 2022. S. 229–234.
5. RD 34.21.122–87. Instrukciya po ustrojstvu molniezashchity zdaniy i sooruzhenij.
6. SO 153-34.21.122–2003. Instrukciya po ustrojstvu molniezashchity zdaniy, sooruzhenij i promyshlennyh kommunikacij: utv. prikazom Minenergo Rossii ot 30.06.2003 № 280.
7. Pis'mo upravleniya po nadzoru v elektroenergetike federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 01.12.2004 № 10-03-04/182.
8. Voronin S. V. Sravnitel'nyj analiz trebovanij normativnyh dokumentov RD 34.21.122-87 i SO 153-

34.21.122-2003 po molniezashchite zdaniy i sooruzhenij // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2018. № 3 (27). S. 22–26.

9. Hodak A. V. i dr. Obschaya ocenka metodov postroeniya zon zashchity sterzhnevyyh molniepriemnikov // Moya professional'naya kar'era. 2021. T. 1. № 26. S. 199–205.

10. Hodak A. V. i dr. Sravnitel'nyj analiz zon zashchity odinochnyyh sterzhnevyyh molniepriemnikov // Moya professional'naya kar'era. 2021. T. 1. № 26. S. 206–212.

11. Harlamenkov A. S. Sovremennaya molniezashchita zdaniy i sooruzhenij. CHast' 1 // Pozharovzryvobezopasnost'. 2019. T. 28. № 6. S. 89–91.

12. Rec V. V., Nikiforov A. I., YArosh A. S. Proektirovanie molniezashchity ob"ektov elektroenergetiki // Materialy konferencij GNII «Nacrazvitiye»: Sbornik izbrannykh statej po materialam nauchnykh konferencij GNII «Nacrazvitiye». 2021. S. 45–49.

13. Kotelevskaya E. A. i dr. Proektirovanie molniezashchitnykh ustrojstv dlya zhivotnovodcheskikh pomeshchenij // Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022. № 178. S. 108–118.

14. Subachev S. V. Primenenie virtual'nykh komp'yuternykh modelej v praktike prepodavaniya special'nykh disciplin // Primenenie sovremennykh form i metodov obucheniya v obrazovatel'nom processe Ural'skogo instituta GPS MCHS Rossii: obzor peredovogo pedagogicheskogo opyta. 2006. S. 32–36.

15. Zubov K. N. Sovershenstvovanie raschetnykh metodov molniezashchity i zazemlyayushchih ustrojstv v neodnorodnykh gruntah: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Lipeck, 2011. 16 s.

УДК 614.835.3

lourant9@rambler.ru

**АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ РИСКА И АНАЛИЗА СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ
ПОЖАРА НА НЕФТЯНОМ ТАНКЕРЕ****ALGORITHM FOR RISK ASSESSMENT AND ANALYSIS OF FIRE
SCENARIOS ON AN OIL TANKER**

*Лоран Н.М.,
Главное управление МЧС России по Кемеровской области Кузбассу, Кемерово*

*Loran N.M.,
Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for
the Kemerovo Region - Kuzbass, Kemerovo*

Статья посвящена вопросам решения некоторых проблем, возникающих при оценке рисков появления и развития пожароопасной ситуации на объектах нефтегазового комплекса России. Особое внимание уделено алгоритмизации подхода по обеспечению противопожарной защиты объектов хранения и наливных терминалов, а также транспортировки нефти и нефтепродуктов танкерными судами. Использован полуколичественный анализ оценки рисков LOPA, позволяющий дать оценку различным опасным сценариям, для определения последствий и исходных событий, приводящих к риску их возникновения, с учётом действия всех независимых уровней защиты объекта. Для качественной оценки применена дискретная шкала критериев рисков. Получена матрица оценки рисков, позволяющая сформировать шкалу перечня значимых опасностей и обеспечивающая полуколичественный анализ уровня риска появления негативного пожароопасного события на объектах защиты. Предложен оригинальный алгоритм оценки риска развития пожара. Сделан вывод о возможности использования полученных результатов для поддержки принятия решений по повышению эффективности обеспечения пожарной безопасности на нефтяных танкерах. Полученные результаты реализованы в виде специализированного пакета прикладных программ для современного и прогрессивного решения проблем обеспечения пожарной безопасности.

Ключевые слова: оценка рисков, пожарная безопасность, нефтегазовый комплекс, анализ опасностей.

The article presents data on some problems in assessing the risks of a fire situation at oil and gas facilities in Russia. Particular attention is paid to the algorithmic approach to ensuring fire protection of storage facilities and loading terminals, as well as the transportation of oil and oil products by tanker ships. A semi-quantitative LOPA risk assessment analysis was used, evaluating various dangerous scenarios, to determine the consequences and initiating events leading to the risk of their occurrence, taking into account the operation of all independent levels of protection of the object. Based on a qualitative assessment, a discrete scale of risk criteria was applied. A risk assessment matrix has been obtained, which makes it possible to form a scale for the list of significant hazards and provides a discrete (semi-quantitative) analysis of the level of risk of a negative event at protected objects. An algorithm for assessing the risk of fire development for the considered objects of protection is proposed. The conclusion is made about the possibility of using the results obtained in the implementation of solutions to improve the quality of fire safety on oil tankers and other objects of the oil and gas complex. It is indicated that the

results obtained are implemented in the form of software for a modern and progressive solution to the problems of ensuring fire safety.

Keywords: risk assessment, fire safety, oil and gas complex, hazard analysis.

В последние годы, в связи с урбанизацией и индустриализацией, количество перевозок морским транспортом существенно возросло. Кроме того, с увеличением объема перевозок легковоспламеняющихся материалов несчастные случаи с пожарами стали становятся все более катастрофическими. С увеличением количества нефтеперевозок танкерными судами растёт угроза загрязнения экологической обстановки в акватории портов. В связи с этим на первый план выходит комплексная проблема обеспечения защиты нефтяных танкеров от пожаров, имеющая самостоятельные и сложные задачи, перед решением которых необходимо оценивать эффективность принятых проектно-технических и организационных решений, проводить анализ уязвимости, осуществлять выбор типовых требований обеспечения пожарной безопасности объектов различных категорий, а также эффективно-стоимостную оптимизацию структуры и состава.

Прочность объектов защиты, связанных с нефтегазовым комплексом, во многом зависит от избежания наступления возможных негативных последствий, сопряженных с различными последствиями промышленных аварий и других чрезвычайных ситуаций [1].

Риск аварийности на объектах защиты не может быть сведен к нулю только

лишь превентивными мероприятиями, так как имеются объективные (вероятностные) факторы, приводящие к незапланированным потерям.

К таким факторам можно отнести природные и техногенные чрезвычайные ситуации, человеческий фактор и ошибки, допущенные на стадии проектирования и строительства, поджоги, спланированные взрывы и т. д.

Основываясь на анализе ущерба, причинённого нефтегазовой отрасли в последнее время, возникает необходимость в разработке алгоритма проектирования архитектуры комплекса проблемно-ориентированных программ оценки риска развития пожароопасной ситуации и определения последствий пожара на танкерах и связанных с ними объектами нефтекомплекса [2].

Оценка уязвимости объекта защиты и определения возможности угроз основывается на методике расчета вероятностных показателей и определения последствий пожара на нефтяном танкере, для разработки которой необходим алгоритм оценки риска и анализа сценариев развития пожара на нефтяном танкере [3].

Создание данного алгоритма определяется особенностями объекта защиты и технологических процессов на нем (рис. 1).

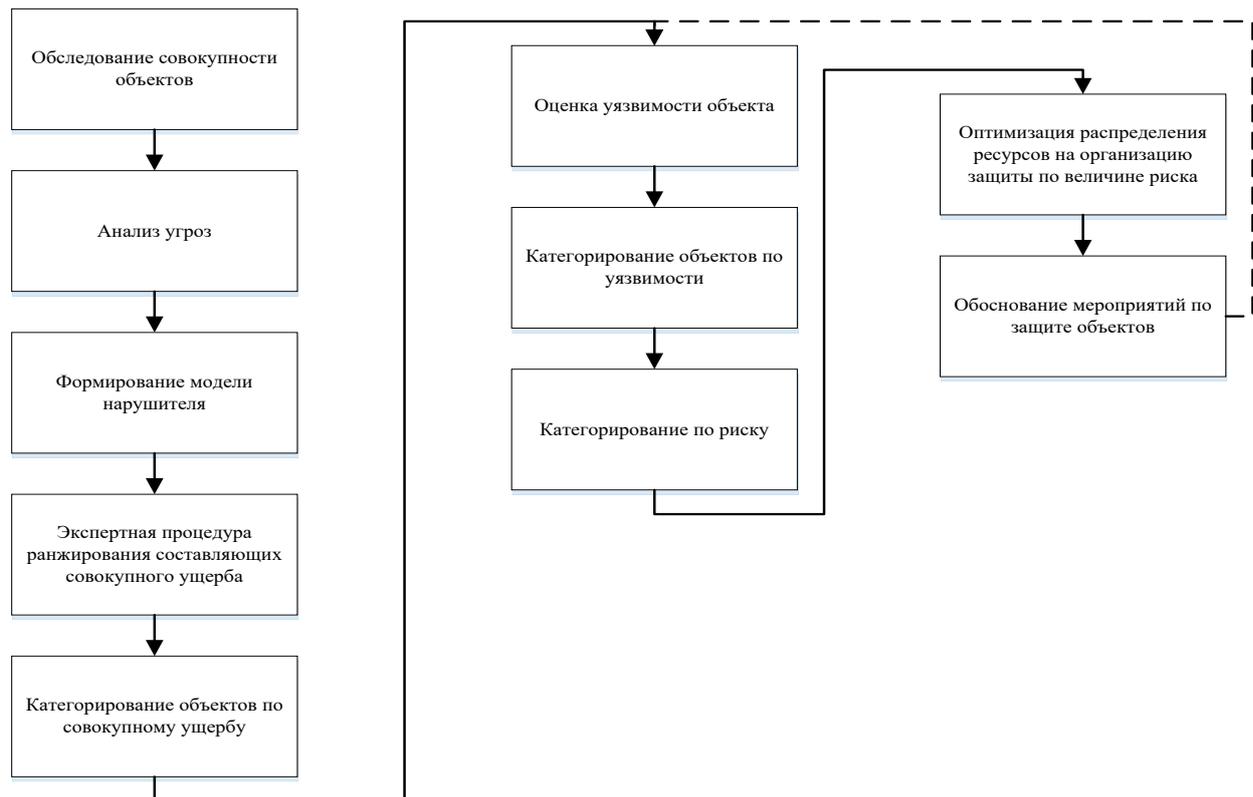


Рис. 1. Схематическое изображение алгоритмического подхода к обеспечению защиты объектов нефтегазового комплекса

Для оценки ущерба от наступления негативных последствий в настоящее время не существует какой-то универсальной шкалы. В России, согласно постановлению правительства Российской Федерации, в качестве критериев для категорирования по потенциальной опасности используют классификацию чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (в зависимости от тяжести последствий). Применение таких обобщённых критериев ограничивает возможности дифференцирования требований к различным объектам.

Шкала критериев для создания алгоритма оценки рисков разрабатывается относительно масштаба и специфики производственной (или иной) деятельности объекта защиты [4]. Выстраиваем структуру шкалы категорирования по составляющим последствий, которые связаны в зависимости воздействий. Чтобы достичь желаемого результата, применяем субъективные (в основном дискретные) шкалы,

чтобы получить количественную оценку ущерба (в условиях отсутствия естественной шкалы или невозможности получения по ней численных значений).

Возможные негативные последствия по ключевым элементам от преднамеренных воздействий содержат в себе непосредственные потери, а также расходы на ликвидацию и расследование аварии, социально-экономические потери, природоохранные и побочные потери.

Разделение объектов защиты по категориям само по себе не решает проблемы обеспечения безопасности, а лишь устанавливает общие требования к системе защиты каждого конкретного объекта и степень потенциальной опасности.

Объекты защиты после их категорирования необходимо дифференцировать в зависимости от очереди оснащения. Объекты I очереди нуждаются в срочном оснащении, оснащение объектов II очереди может осуществляться позднее, а оснащение

объектов III очереди может быть оснащено на последнем этапе [5].

Для создания алгоритма оценки рисков воспользуемся анализом уровня защиты LOPA, позволяющим сравнивать

различные сценарии рисков, рассчитывая возможные последствия до порядка величины серьезности, что необходимо для построения шкалы критериев [6]. Схема процесса анализа приведена на рис. 2.

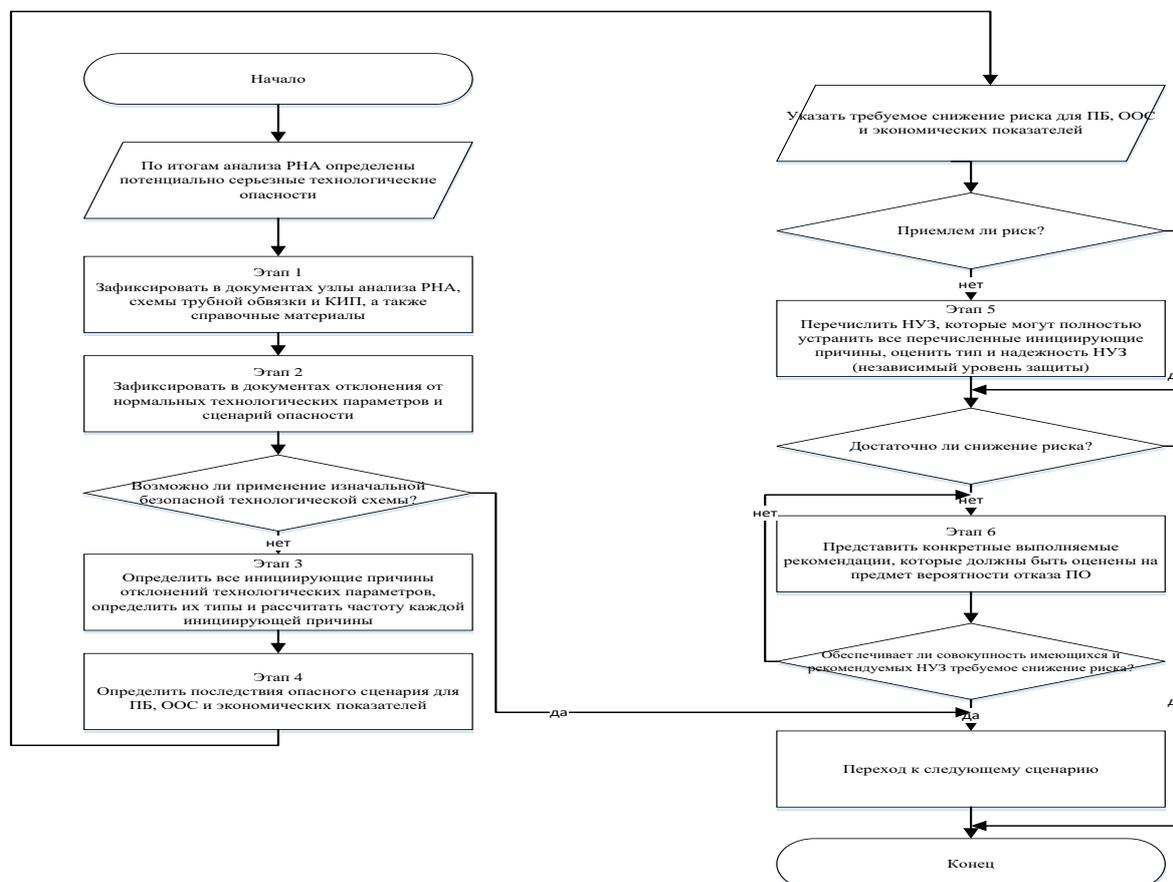


Рис. 2. Схема процесса анализа уровней защиты LOPA

На основе проведенного анализа вероятности возникновения происшествия и причиненного ущерба строится диаграмма рисков, затем составляется таблица возможных негативных сценариев. Полученная таблица используется для определения рисков и их дискретной (полуколичественной) оценки [7].

Путём перемножения масштаба и вероятности возникновения риска (результат которых составляет от 1 до 5) получаем оценку уровня риска, показатели которой

находятся в диапазоне от 1 до 25. При формировании матрицы оценки рисков учитывается что, к значимым относятся риски с результатом оценки 8 – 25 [8].

Итогом проведенного анализа стала матрица оценки рисков, обеспечивающая дискретный анализ уровня риска негативного события при проведении различных операций на объекте защиты [9].

Полученный алгоритм оценки рисков приведен на рис. 3.

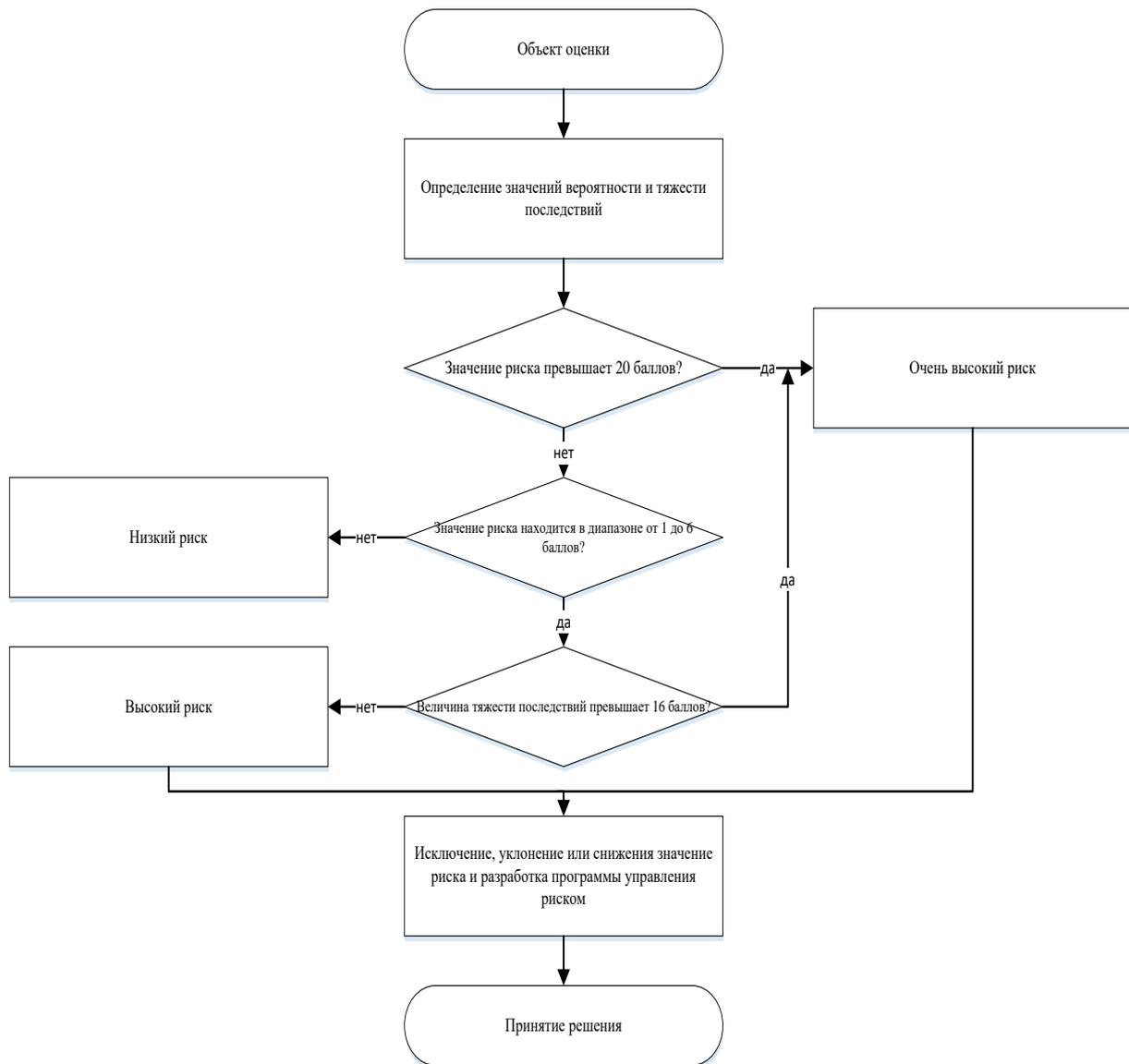


Рис. 3 Схема разработанного алгоритма оценки риска

Для верификации и практического использования разработанного алгоритма получен патент на специальное программное обеспечение для ЭВМ, позволяющее

проводить расчеты вероятностных показателей и определять последствия пожара на нефтяном танкере [10].

Литература

1. Калач А. В. и др. Анализ аварийности развития пожароопасной ситуации на нефтяном танкере // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. № 4 (19). С. 38–43.
2. Рукомойникова (Голенцова) М. А. Ранжирование техногенных экологических рисков при мультимодальном транспорте углеводородов // Журнал правовых и экономических исследований. 2012. № 2. С. 162–165.
3. Домнина О. Л. и др. Оценка риска возникновения транспортных происшествий на реках в границах республики Татарстан // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 79–84.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. IV. Противопожарная защита. СПб., 2016. URL: http://www.rs-class.org/upload/iblock/16c/2-020101-087_6.pdf (дата обращения: 03.05.2021).
5. Шацкова Ю. В. Повышение безопасности эксплуатации морских перегрузочных комплексов (терминалов) на основе оценки риска и мониторинга экстремальных природных явлений: дис. ... канд. техн. наук. Новороссийск, 2012. 180 с.
6. Рябинин И. А., Черкесов Г. Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М., 1981. 264 с.
7. Драпак К. А., Крылов Е. Г., Капитанов А. В. Анализ и оценка рисков СПГ-терминала с помощью диаграммы рисков // Вестник МГТУ «Станкин». 2021. № 2 (57). С. 37–43.
8. Черкесов Г. Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. М., 1987. 116 с.
9. Кравец В. А. Системный анализ безопасности в нефтяной и газовой промышленности. М., 1984. 117 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 20.06.2022 № 2022661853 / Калач А. В., Смоленцева Т. Е., Лоран Н. М., Паршина А. П. Система оценки риска.

References

1. Kalach A. V. i dr. Analiz avarijnosti razvitiya pozharoопасnoj situacii na neftyanom tankere // Sibirskij požarno-spatatel'nyj vestnik. 2020. № 4 (19). S. 38–43.
2. Rukomojnikova (Golencova) M. A. Ranzhировanie tekhnogennyh ekologicheskikh riskov pri mul'timodal'nom transporte uglevodorodov // ZHurnal pravovyh i ekonomicheskikh issledovanij. 2012. № 2. S. 162–165.
3. Domnina O. L. i dr. Ocenka riska vznikoveniya transportnyh proisshestvij na rekah v granicah respubliki Tatarstan // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 4-2 (46). S. 79–84.
4. Pravila klassifikacii i postrojki morskih sudov. CH. IV. Protivopozharnaya zashchita. SPb., 2016. URL: http://www.rs-class.org/upload/iblock/16c/2-020101-087_6.pdf (data obrashcheniya: 03.05.2021).
5. Shackova YU. V. Povyshenie bezopasnosti ekspluatatsii morskih peregruzochnyh kompleksov (terminalov) na osnove ocenki riska i monitoringa ekstremal'nyh prirodnyh yavlenij: dis. ... kand. tekhn. nauk. Novorossijsk, 2012. 180 s.
6. Ryabinin I. A., Cherkesov G. N. Logiko-veroyatnostnye metody issledovaniya nadezhnosti strukturno-slozhnyh sistem. M., 1981. 264 s.
7. Drapak K. A., Krylov E. G., Kapitanov A. V. Analiz i ocenka riskov SPG-terminala s pomoshch'yu diagrammy riskov // Vestnik MGTU «Stankin». 2021. № 2 (57). S. 37–43.
8. Cherkesov G. N. Metody i modeli ocenki zhivuchesti slozhnyh sistem. M., 1987. 116 s.
9. Kravec V. A. Sistemnyj analiz bezopasnosti v neftyanoj i gazovoj promyshlennosti. M., 1984. 117 s.
10. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM ot 20.06.2022 № 2022661853 / Kalach A. V., Smolenceva T. E., Loran N. M., Parshina A. P. Sistema ocenki riska.

УДК 504.064

Nikolayelfimov@mail.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ КАПЕЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА,
КАК ОПЕРАТИВНОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ПОЧВ СЕВЕРНЫХ РАЙОНОВ НЕФТЕПРОДУТАМИ РАЗНОГО ВИДА**

**APPLICATION OF DRIP-LUMINESCENT ANALYSIS AS AN OPERATIONAL
METHOD FOR DIAGNOSING SOIL CONTAMINATION IN THE NORTHERN
REGIONS WITH OIL PRODUCTS OF DIFFERENT TYPES**

*Елфимов Н.В.,
ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
г. Железногорск*

*Elfimov N.,
Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk*

В данной статье рассмотрена методика проведения оценки распространения загрязнений почвы нефтепродуктами разного вида. Приведен ряд примеров наиболее существенных аварий, связанных с разливами нефти и (или) нефтепродуктов, повлекших за собой тяжелые последствия для окружающей среды. Рассмотрен почвенный слой арктической зоны, состав нефти и её основные составляющие компоненты, а также отражены негативные особенности влияния нефти и (или) нефтепродуктов на почвенный покров. Проведено описание подготовки образцов почв и выбора материала в качестве нейтрального носителя, позволяющего сохранять полученные результаты исследования на длительный период времени и в дальнейшем использовать полученные фильтры для проведения различных экспертиз. Разобраны этапы проведения эксперимента, связанного с загрязнением почвы нефтепродуктами разного вида. На основании проведённых экспериментов и полученных результатов сделан вывод об эффективном применении метода капельно-люминесцентного анализа для определения уровня загрязнения почвенного покрова и количества привнесения, что является одним из основных факторов своевременного принятия решений для проведения аварийно-спасательных работ по ликвидации последствий аварий, связанных с разливами нефти и (или) нефтепродуктов. С учетом результатов проведенных исследований предложено применять метод капельно-люминесцентного анализа как экспресс-анализа для диагностики загрязнения почвы непосредственно на месте происшествия.

Ключевые слова: нефтегазовая отрасль, нефть, нефтепродукты, капельно-люминесцентный анализ, экспресс-анализ, область свечения.

This article discusses the methodology for assessing the spread of soil pollution by petroleum products of various types. A number of examples of the most significant accidents involving oil and/or petroleum product spills that have had severe environmental consequences are provided. The soil layer of the Arctic zone, the composition of oil and its main components, as well as negative features of the influence of oil and (or) petroleum products on the soil cover are considered. A description of the preparation of soil samples and the selection of material as a neutral carrier was carried out, which makes it possible to save the obtained study results for a long period of time and subsequently use the obtained filters for various examinations. The stages of the experiment related to soil pollution with petroleum products of various types were analyzed. Based on the experiments

conducted and the results obtained, it was concluded that the drip-luminescent analysis method was effectively used to determine the level of soil contamination and the amount of introduction, which is one of the main factors for timely decision-making for emergency rescue operations to eliminate the consequences of accidents related to oil and (or) petroleum products spills. Taking into account the results of the studies, it is proposed to use the drop-luminescent analysis method as a rapid analysis for diagnosing soil pollution directly at the scene.

Keywords: oil and gas industry, oil, oil products, drip-luminescent analysis, express analysis, glow area.

Сегодня для поддержания сырьевого сектора экономики страны специалисты в данной области активно проводят работы по изысканию и освоению новых месторождений полезных ископаемых, возводя при этом различные производственные объекты. Стоит отметить, что повышенная активность происходит по освоению северных территорий нашей страны, что является одним из приоритетных направлений стратегического развития. Учитывая масштабы проведения работ на данных территориях, нельзя исключать возможности возникновения различных ситуаций, связанных с несанкционированным разливом нефти и (или) нефтепродуктов по почвенному покрову, что в последствии негативно сказывается на состоянии окружающей среды. Учитывая статистику происшествий, связанных с разливами нефти и (или) нефтепродуктов за последние годы, можно выделить ряд аварий, повлекших за собой тяжелые последствия:

г. Находка Приморского края – разлив мазута (2500 т);

г. Норильск Красноярского края – разлив дизельного топлива (более 20000 т);

г. Химки Московской области – разлив ГСМ (23000 м²);

Таймыр – разлив ГСМ (1 т).

И это еще не полный список происшествий, связанных с разливами нефтепродуктов по почвенному покрову. Причины, разливов нефти и (или) нефтепродуктов по почвенному покрову могут быть самые разные и возникать на самых разных стадиях работы, начиная с проведения геологоразведки и заканчивая конечной ста-

дией поставки сырья до потребителя. Следует отметить, что аварии на нефтепроводах по степени негативного влияния, оказываемого на окружающую среду, превосходят другие опасные факторы. Более негативное влияние оказывают аварии, произошедшие на нефтепроводах, имеющих значительную протяженность. Также стоит отметить, что трубопроводы прокладываются как открытым, так и закрытым способом, что в значительной мере влияет на своевременность обнаружения порыва.

Учитывая, что почвы в районах арктической зоны формировались в тяжелых климатических условиях, они характеризуются слабым развитием почвенных процессов, гумусный горизонт которых составляет от 4 до 10 см. В большей мере почва состоит из суглинистых и глинистых отложений генезиса в 3 – 6 см. из щебеночных и песчаных пород [1]. В целом рассматривая устойчивость почв к нефтяным загрязнениям, можно отметить высокую проницаемость и сорбционную особенность подзолистых почв и способность к высокой вертикальной проницаемости загрязнения у аллювиальных почв. Также к почвам наименее устойчивым к загрязнению нефтью и (или) нефтепродуктами относятся болотистые и глеевые почвы, обладающие специфическими свойствами. Для проведения эксперимента, связанного с определением идентификации загрязнения почвы нефтепродуктами, были использованы схожие образцы песчаной и суглинистой почв.

Следует отметить, что сегодня в арсенале у экспертов имеется достаточно ме-

тодов и возможностей проведения экспертиз по определению подобных загрязнений, при этом существуют методы, позволяющие получать результаты экспертизы в реальном времени. Основным направлением развития экспертиз было и остается совершенствование существующих методик, а также внедрение современных приборов, которые способны проводить аналитический анализ вместо лабораторного [1, 3 – 5]. Стоит отметить, что, несмотря на проводимую активную работу в данном направлении, а использование новых технологий при проведении экспертиз, остаются случаи допущения неточностей на начальной стадии, а именно на стадиях проведения отбора пробы и дальнейшей ее подготовки.

Таким образом, учитывая, что современные технологии не гарантируют в полной мере достоверность полученных результатов, а также имеют место трудности, связанные с проведением мероприятий по взятию проб отбора загрязненной почвы в суровых климатических условиях и отдаленных мест возможного происхождения аварии, предлагается на начальной стадии определения природы загрязнения почвы использовать в качестве экспресс-анализа капельно-люминесцентный метод. Данный метод предполагает нанесение на загрязненную почву нелюминесцирующего растворителя с последующей визуальной фиксацией результатов при ультрафиолетовом свете. Так как при визуальной фиксации полученных результатов возможны неточности в определении свечения на поверхности загрязнения, а также учитывая затруднения проведения такого экспресс-анализа на почве из-за быстрого впитывания растворителя в почву, предлагается при исследовании нефтяных загрязнений переносить нефтяные компоненты на нейтральный носитель, который позволит сохранить результаты и использовать их в дальнейшем при проведении различных экспертиз. В ходе сравнительного анализа различных материалов для использования в качестве нейтрального носителя

был сделан выбор в пользу фильтров обеззоленных маркировки «красная полоса» [3, 4].

Немаловажно помнить, что нефть по своей сути является веществом, которое содержит в себе большое разнообразие углеводородов различного строения природного происхождения, и что нефть каждого месторождения отличается по следующим параметрам:

плотность (легкие и тяжелые сорта);
состав серы (малосернистая – менее 0,5 %, сернистая – 0,5%, высокосернистая – более 2,0 – 2,5 %);

содержание парафинов (малопарафинистые – не более 1,5 об. %, парафинистые – от 1,5 до 6 об. % и высокопарафинистые – более 6 об. %);

газосодержание (в пластовых условиях показатель месторождения нефти на территории Российской Федерации в диапазоне от 20 до 1000 м³/т).

Также нефть в своем составе содержит углерод, водород, азот, углекислый газ, кислород, серу, хлор в незначительных количествах, фосфор, мышьяк и т. п. [2]. Следует учитывать тот факт, что парафин имеет температуру застывания +18 °С и выше, трудно поддается окислению и практически не разрушается при воздействии на него микроорганизмов, соответственно, он губительно влияет на состояние почвы. При этом парафин, попадая в почву, в значительной мере препятствует свободному влаго- и воздухообмену, что в последствии приводит к полной деградации биоценоза. Именно поэтому в случае обнаружения разлива нефтепродуктов необходимо установить характер аварии, объем причиненного ущерба для окружающей среды и возможность ее восстановления. Для этого необходимо в кратчайшие сроки провести распознавание источника загрязнения и по возможности установить виновного в данном происшествии [3, 4]. Для понимания масштабов произошедшей аварии, специалистам необходимо иметь данные по распространению нефтяного загрязнения, а

менно скорость загрязнения по горизонтали почвенного покрова и его глубину. Эти показатели являются одними из основных для определения первоочередности действий, направленных на проведение аварийно-спасательных работ, связанных с ликвидацией последствий разлива нефти и (или) нефтепродукта по почвенному покрову. При этом учитывая весь ряд реализуемых задач при проведении определения источника загрязнения, можно утверждать, что это остаётся одним из основных направлений в области проведения экспертизы [3,4].

Для подтверждения эффективности применения капельно-люминесцентного анализа в практической деятельности как метода экспресс-анализа было проведено исследование идентификации загрязнения почв нефтепродуктами.

В ходе проведения исследования объект исследования использовались бензин марки АИ-95 и дизельное топливо «универсальное». Дерново-подзолистая песчаная и суглинистая почва были рассмотрены как носители загрязнения. На первом этапе проведения исследования отобранную почву просушили в естественных условиях и далее просеяли с помощью сита (1 мм), что позволило очистить почву от мусора и различных включений. Полученные образцы почв подверглись загрязнению нефтепродуктами (3 мл) с последующим исследованием образцов, которое проводилось через шесть дней после их загрязнения.

Проведение исследования с применением метода капельно-люминесцентного анализа заключался в следующем:

Фильтровальная бумага прижималась при помощи стеклянной палочки к поверхности загрязненного образца почвы, далее при помощи шприца по ней к центру подавался растворитель (гексан – 3 мл) Подача осуществлялась капельным методом с последующим изучением фильтров в ультрафиолетовом свете. Результаты исследования были изучены сразу после нанесения растворителя, а также после его полного

испарения. В целях сравнения результатов исследования в первую очередь осуществлялся анализ образцов почв без добавления в неё нефтепродуктов. При исследовании незагрязнённых почв были зафиксированы органические компоненты, характеризующиеся свечением в ультрафиолетовом свете. Далее проводились исследования почв, загрязнённых бензином и дизельным топливом. По полученным результатам установлено, что граница фиксируемых пятен и интенсивность люминесценции имеют заметные отличия для образцов почв, загрязнённых бензином и дизельным топливом.

Результаты, полученные при исследовании образцов почв, загрязнённых бензином, имеют характерное яркое свечение в виде кольца и разброс диаметра пятен не превышает 10 %, что означает хорошую воспроизводимость получаемых результатов. Для исключения отклонений показаний в ходе проведения параллельных исследований загрязнённых почв и соблюдения одинаковых условий (исключение ошибки эксперта), необходимо перед началом разработки методики конкретно определить используемое количество экстрагента, а также временной интервал его нанесения на загрязнённую поверхность. При наличии соответствующих технических средств рекомендовано применять оборудование дающее возможность равномерного поступления растворителя на фильтр.

По результатам проведенного исследования загрязнённых образцов почв была выявлена прямая зависимость между образованным диаметром пятна и количества нефтепродукта. Также необходимо отметить, что существенного увеличения интенсивности свечения при ультрафиолетовом свете не наблюдалось, что указывает на концентрационное тушение люминесценции. Полученный результат исследования образцов почв, загрязнённых бензином, показал следующее: голубое свечение в центре пятна и ярко-голубое по краям,

указывает на хроматографическое разделение компонентов бензина марки АИ-95 в образце.

В ходе визуального сравнения полученных результатов капельно-люминесцентного анализа загрязнённых бензином и дизельным топливом почв необходимо отметить, что при загрязнении дизельным топливом полученные пятна обладают более ярким свечением люминесценции с широким ярко-голубым ореолом по краю, чем у почв, загрязненных бензином. Также отмечено, что чем больше количества дизельного топлива в почве, тем будет ярче свечение в ультрафиолетовом свете, а также будет происходить увеличение диаметра пятна.

Опираясь на полученные результаты проведенного исследования, можно говорить, что применение метода капельно-люминесцентного анализа как экспресс-анализа на месте происшествия позволяет провести визуальное (по особенностям свечения) диагностирование почвы, определить наличие загрязнения, вид и количество принесенного нефтепродукта.

При проведении исследований на месте аварии, связанной с разливами нефтепродуктов, необходимо отметить, что среднее значение диаметров пятен может существенно отличаться, так как в значительной мере это связано с наличием изначального загрязнения почвы, ведь на по-

лучаемый результат будут оказывать влияние почвообразующие процессы и свойства самой почвы.

Компоненты сильно загрязненных почв с наличием значительного количества нефтепродуктов могут повлечь к тушению люминесценции, что будет влиять на общую картину люминесценции. Стоит отметить, результаты, полученные в ходе исследования загрязненных почв, определяют признаки, которые характерны загрязнению бензином или дизельным топливом. Опираясь на результаты, исследования можно говорить об эффективном применении метода капельно-люминесцентного анализа в качестве экспресс-анализа, пригодного для проведения экспертизы природы загрязнения почв нефтепродуктами разного вида.

Учитывая, что одним из приоритетных направлений создания современных методик, направленных на проведение исследований в области мониторинга и анализа объектов окружающей среды, является минимизация времени аналитического определения [6 – 9], а также упрощение проведения экспресс-анализа загрязнения почвы нефтепродуктами, основанного на капельно-люминесцентном методе, предлагается использовать данный метод в качестве основного для проведения первоначальной диагностики мест загрязнения почвы в труднодоступной местности, а также в суровых климатических условиях крайнего севера.

Литература

1. Разливы нефти и нефтепродуктов в России за 2020 год. URL: <https://terra-ecology.ru/razlivy-nefteproduktov-v-rossii-za-2020> (дата обращения: 09.03.2021).
2. Нефтяные реки. URL: <https://dprom.online/oilngas/neftyanye-reki/> (дата обращения: 15.02.2019).
3. Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М., 2018. 207 с.
4. Ожегов Э. А., Гусев К. Г., Ловчиков В. А. Использование высокоэффективной жидкостной хроматографии для идентификации нефтяных загрязнений // Научно-аналитический журнал «Надзорная деятельность и судебная экспертиза в сфере безопасности». 2013. № 4. С. 61–67.
5. Фаргиев М. А., Галишев М. А., Щербаков О. В. Анализ состояния почвенного покрова на объектах нефтегазового комплекса по результатам изучения перераспределения нефтяного загрязнения между сопредельными природными средами // Проблемы управления рисками в техносфере. 2013. № 3 (27). С. 40–47.
6. Ожегов Э. А., Гадышев В. А., Щербаков О. В. Изучение возможности использования полиароматических углеводородов нефти для идентификации нефтяных загрязнений // Научный электронный журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». 2013. № 2. С. 22–28.

7. Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М., 2018. 207 с.
8. Галишев М. А. и др. Мониторинг опасного воздействия нефтепродуктов на природные и техногенные системы в условиях чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса. СПб., 2017. 209 с.
9. Елфимов Н. В., Бельшина Ю. Н., Клейменов А. В. Способ исследования нефти и нефтепродуктов методом люминесцентного анализа при решении задач диагностики и идентификации загрязнений // Научно-аналитический журнал «Вестник Воронежского института ГПС МЧС России». 2017. № 2 (23). С. 99–104.

References

1. Razlivy нефти i nefteproduktov v Rossii za 2020 god. URL: <https://terra-ecology.ru/razlivy-nefteproduktov-v-rossii-za-2020> (data obrashcheniya: 09.03.2021).
2. Neftyanye reki. URL: <https://dprom.online/oilngas/neftyanye-reki/> (data obrashcheniya: 15.02.2019).
3. Pikovskij YU. I. Prirodnye i tekhnogennye potoki uglevodorodov v okruzhayushchej srede. M., 2018. 207 s.
4. Ozhegov E. A., Gusev K. G., Lovchikov V. A. Ispol'zovanie vysokoeffektivnoj zhidkostnoj hromatografii dlya identifikacii neftyanyh zagryaznenij // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Nadzornaya deyatel'nost' i sudebnaya ekspertiza v sfere bezopasnosti». 2013. № 4. S. 61–67.
5. Fargiev M. A., Galishev M. A., Shcherbakov O. V. Analiz sostoyaniya pochvennogo pokrova na ob"ektah neftegazovogo kompleksa po rezul'tatam izucheniya pereraspredeleniya neftyanogo zagryazneniya mezhdru sopredel'nymi prirodnyimi sredami // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2013. № 3 (27). S. 40–47.
6. Ozhegov E. A., Gadyshchev V. A., Shcherbakov O. V. Izuchenie vozmozhnosti ispol'zovaniya poliaromaticeskikh uglevodorodov nefiti dlya identifikacii neftyanyh zagryaznenij // Nauchnyj elektronnyj zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii». 2013. № 2. S. 22–28.
7. Pikovskij YU. I. Prirodnye i tekhnogennye potoki uglevodorodov v okruzhayushchej srede. M., 2018. 207 s.
8. Galishev M. A. i dr. Monitoring opasnogo vozdejstviya nefteproduktov na prirodnye i tekhnogennye sistemy v usloviyah chrezvychajnyh situacij na ob"ektah neftegazovogo kompleksa. SPb., 2017. 209 s.
9. Elfimov N. V., Bel'shina YU. N., Klejmenov A. V. Sposob issledovaniya nefiti i nefteproduktov metodom lyuminescentnogo analiza pri reshenii zadach diagnostiki i identifikacii zagryaznenij // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MCHS Rossii». 2017. № 2 (23). S. 99–104.

УДК 614.84

bezzaponnay@mail.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ДЛЯ ОЦЕНКИ ГОРЮЧЕСТИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ****APPLICATION OF THE SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS METHOD
FOR THE ASSESSMENT OF THE FLAMMABILITY OF SUBSTANCES
AND MATERIALS**

*Беззапонная О.В., кандидат технических наук, доцент,
Лузина М.Д., Динисламов М.М.*

*Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России
г. Екатеринбург*

*Bezzaponnaya O., Luzina M., Dinislamov M.,
Ural Institute of the State Fire Service EMERCOM of Russia,
Yekaterinburg*

Приведены результаты исследований материалов различной химической природы методом синхронного термического анализа (СТА 449 F5 Jupiter «Netzsch», Германия) в инертной среде азота и окислительной среде воздуха с целью изучения горючести. Установлено, что в качестве критериев для оценки горючести и определения группы горючести исследуемого материала целесообразно использовать такие термоаналитические характеристики, как экзотермический эффект процесса термоокислительной деструкции материала, интенсивность тепловыделения и зольный остаток при условии экзотермического эффекта процесса термоокислительной деструкции материала. Предложен методический подход для определения группы горючести материалов методом синхронного термического анализа.

Ключевые слова: горючесть, группа горючести, термоокислительная деструкция, теплота горения, скорость тепловыделения.

The results of studies of materials of various chemical nature by the method of synchronous thermal analysis (STA) (STA 449 F5 Jupiter "Netzsch", Germany) in an inert atmosphere of nitrogen and an oxidizing atmosphere of air in order to study combustibility are presented. It has been established that it is advisable to use such thermoanalytical characteristics as the exothermic effect of the process of thermal-oxidative destruction of the material, the intensity of heat release and the ash residue as criteria for assessing the combustibility and determining the combustibility group of the material under study, provided that the exothermic effect of the process of thermal-oxidative destruction of the material is exothermic. A methodical approach is proposed for determining the combustibility group of materials by the method of synchronous thermal analysis.

Keywords: combustibility, combustibility group, thermal-oxidative destruction, combustion heat, heat release rate.

Введение

Оценка горючести является важной задачей для получения исходных данных при математическом моделировании развития пожара и оценки его динамики, для

разработки систем противопожарной защиты, предотвращения пожара и взрыва. При производстве пожарно-технической экспертизы знание горючести материалов позволяет эксперту оценить пути распро-

странения и развития пожара для определения местнахождения очага пожара при отработке версий о причинах пожара.

Под горючестью понимают склонность веществ и материалов к распространению пламени или к тлению. В соответствии с ГОСТ 12.1.044 – 2018 «Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» вещества и материалы по горючести в зависимости от значений максимального приращения температуры, потери массы и продолжительности устойчивого горения подразделяются на горючие, трудногорючие и негорючие. Горючие материалы подразделяются на трудновоспламеняемые и легковоспламеняемые в зависимости от времени достижения максимального приращения температуры. При этом допускается сходимость и воспроизводимость результатов исследований до 25 %. Для строительных материалов группа горючести определяется в соответствии с ГОСТ 30244 – 94. В соответствии с ГОСТ Р 57270 – 2016 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть» строительные материалы в зависимости от значений параметров горючести подразделяют на негорючие (НГ) и горючие (Г).

Анализ нормативной и научно-технической литературы свидетельствует о том, что горючесть – это комплексная характеристика материалов, способных гореть (тлеть). Для оценки горючести веществ и материалов используют такие важные характеристики, как потеря массы материалом при воздействии на него открытого пламени, тепловой эффект (теплоту горения) (метод испытания EN ISO 1716), определяемый в атмосфере кислорода, время самостоятельного горения, для полимерных материалов – кислородный индекс. Для термопластичных полимеров, по мнению авторов работы [1], необходимо ещё также учитывать наличие горящих капель расплавленного полимерного материала, определяемых методом EN ISO 11925 – 2, указывающих на его повышенную пожарную опасность, что в

ряде случаев совпадает с результатами испытаний этих же материалов по ГОСТ 30244 – 94, в соответствии с которым такие материалы являются сильно горючими материалами (группа горючести Г4).

Таким образом, для оценки горючести веществ и материалов применяют различные характеристики, определяемые разными методами. Зачастую сложно сравнить результаты исследований, полученные разными методами в разных условиях. Кроме этого, некоторые из применяемых методов характеризуются высокой погрешностью и низкой воспроизводимостью. Все эти факты подводят к выводу о целесообразности применения одного универсального метода, позволяющего в полной мере оценить горючесть исследуемого вещества или материала.

В настоящее время всё более востребованными методами для решения диагностических задач экспертных исследований являются современные инструментальные методы, характеризующиеся высокой информативностью, точностью и воспроизводимостью результатов, в частности, метод синхронного термического анализа (СТА). Данный метод направлен на фиксацию аналитического сигнала физико-химических свойств вещества в процессе температурных воздействий. Термический анализ имеет ряд преимуществ перед другими методами исследований: гибкость постановки эксперимента, одновременное получение нескольких термоаналитических характеристик исследуемого материала, быстрое получение информации (снятие термограммы), возможность автоматизации при обработке данных, малое количество вещества для анализа.

Метод СТА достаточно часто применяется для исследования физико-химических свойств различных веществ и материалов при воздействии высоких температур [2 – 5]. Данным методом можно определить не только потерю массы при той или иной температуре, но и скорость потери массы [6 – 9], не только теплоту горения, но и скорость выделения тепла

[10–11], определить такие показатели пожарной опасности, как температура воспламенения и температура самовоспламенения [3], косвенным (расчётным) способом с использованием формулы Ван-Кревелена по величине коксового остатка [12] можно определить кислородный индекс полимерных материалов, можно определить температуры плавления термопластичных полимеров, представляющих повышенную пожарную опасность за счёт их плавления и растекания при воздействии высоких температур пожара. При всех достоинствах метода СТА, для решения задач пожарно-технической экспертизы метод применяется редко: отсутствуют методики, используя которые эксперты могли бы решать диагностические задачи при производстве пожарно-технической экспертизы. В связи с этим исследования с целью разработки методики оценки горючести различных веществ и материалов методом СТА являются весьма актуальными.

Методика проведения исследований

Исследования материалов проводились методом синхронного термического анализа (СТА) на приборе STA 449 F5 Jupiter «Netzsch» (Германия). В качестве объектов исследования выбраны различные по химической природе материалы: самый распространённый природный полимер, характеризующийся высокой горючестью, – древесина (берёза); полимер, часто применяемый в качестве отделочного ма-

териала домов и квартир, – линолеум, основным компонентом которого является поливинилхлорид (ПВХ); композитный полимерный состав, способный терморасширяться при воздействии высоких температур, гипсовая финишная шпаклёвка ROTBAND.

Исследования проводились при скорости нагрева 20 °С/мин в корундовых тиглях, с расходом газа 75 мл/мин. Для оценки горючести анализируемых материалов испытания проводились как в инертной среде, так и в среде воздуха, чтобы исключить экзотермические процессы, протекающие одновременно с процессом термоокислительной деструкции исследуемых материалов. К таким экзотермическим процессам относятся: процессы кристаллизации и структурирования, полимеризации, адсорбции. Процесс же термоокислительной деструкции (горение) протекает только в окислительной среде. Отсутствие экзотермического эффекта в окислительной среде свидетельствует о негорючести исследуемого материала.

Результаты исследований и их обсуждение

Рассмотрим термограммы исследуемых материалов в инертной среде азота и в среде воздуха и оценим с помощью программного обеспечения их термоаналитические характеристики. Термограмма, полученная в ходе термического анализа древесины (берёзы) в инертной среде азота, представлена на рис. 1.

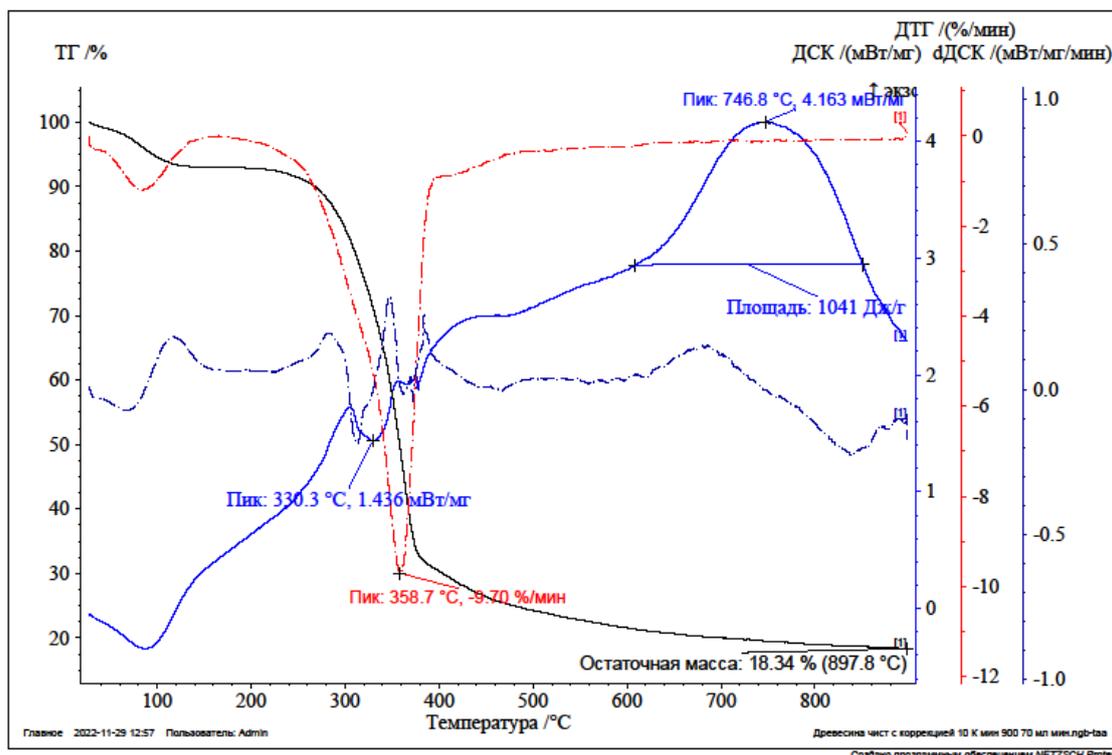


Рис. 1. Термограмма пиролиза древесины берёзы в атмосфере азота

Анализ термогравиметрической (ТГ) и дифференциальной термогравиметрической (ДТГ) кривых свидетельствует о двух стадиях пиролиза древесины в инертной среде (два ДТГ-пика). Наблюдается интенсивная потеря массы в интервале температур 300–400 °С с интенсивностью 9,7 %/мин. Экзотермического эффекта в интервале 180–500 °С не наблюдается, то есть в данном интервале температур никаких экзотермических процессов не проте-

кает. Заключительная стадия пиролиза древесины характеризуется небольшим экзотермическим эффектом с максимумом при температуре 746,8 °С. Небольшой положительный тепловой эффект в интервале температур 600–900 °С обусловлен протеканием структурных превращений за счёт образованием связей $-C=C-$.

Термограмма древесины берёзы в окислительной среде воздуха представлена на рис. 2.

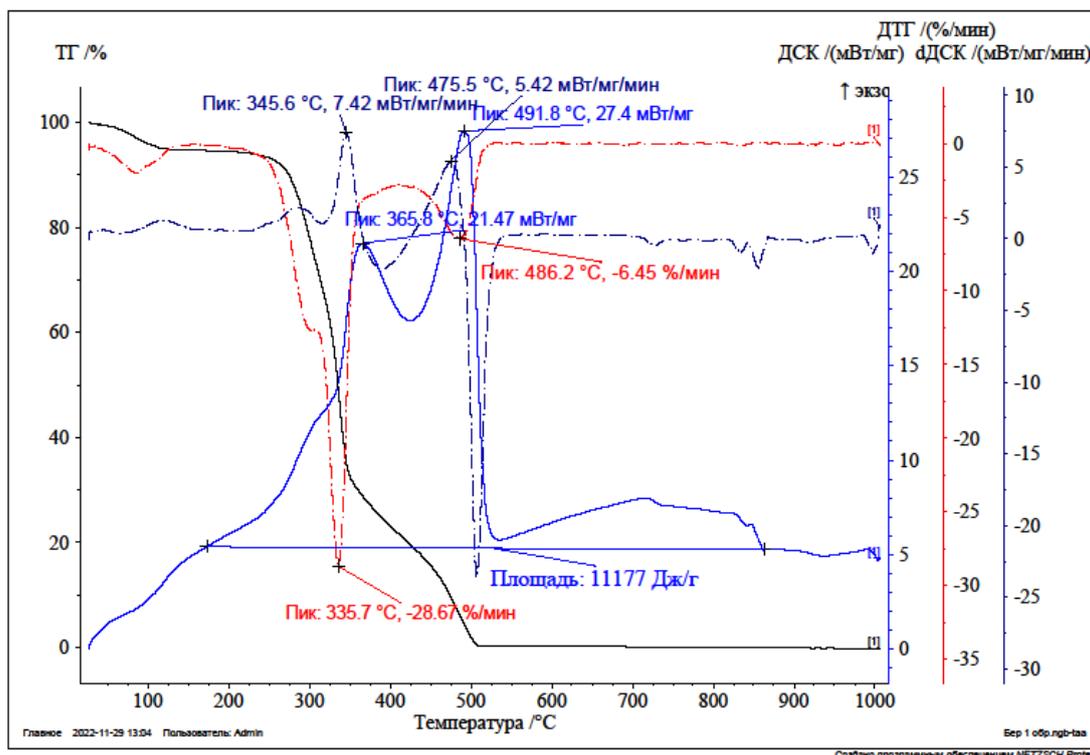


Рисунок 2. Термограмма образцов древесины берёзы в среде воздуха

Анализ ТГ- и ДТГ-кривых свидетельствует о трёх стадиях (трёх ДТГ-пиках) протекания термолитической древесины с ярко выраженным экзотермическим эффектом в интервале температур 180–520 °С, указывающим на горение древесины в указанном интервале температур. Зольный остаток (ЗО) – 0,20 %.

Суммарный тепловой эффект горения древесины составил 11 177 Дж/г. Отсутствие данного эффекта в инертной среде свидетельствует, что экзотермический эффект обусловлен только термоокислительной деструкцией (горением) древесины.

Важной термоаналитической характеристикой, определяемой по дифференцированной ДСК-кривой, является скорость

тепловыделения или теплопоглощения. Полученная информация позволяет судить об интенсивности протекания теплового процесса. При оценке горючести материала интенсивность тепловыделения имеет большое значение. Максимальная скорость тепловыделения древесины (берёзы) наблюдалась в интервале температур 300 – 400 °С и составила 7,42 мВт/мг/мин.

Для исследований был выбран полимер, часто применяемый в качестве отделочного материала домов и квартир – линолеум. Термограмма линолеума, полученная методом СТА в инертной среде азота, представлена на рис. 3.

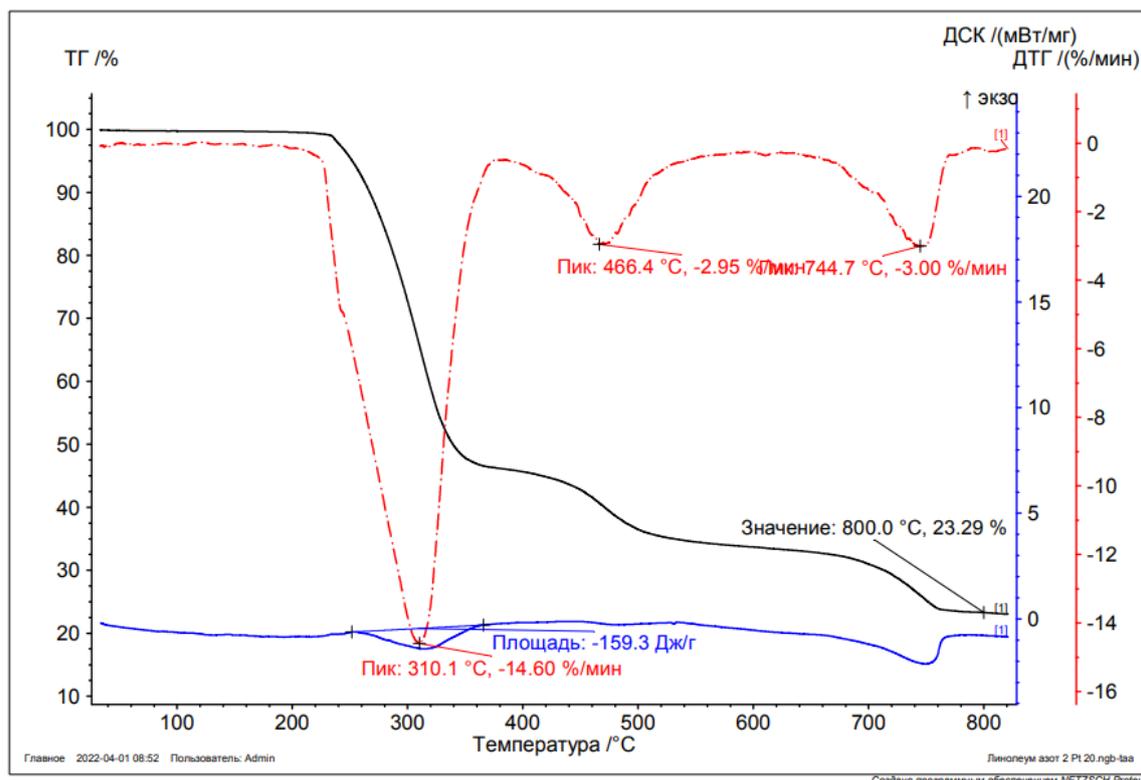


Рис. 3. Термограмма линолеума в инертной среде азота

Анализ кривой дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) свидетельствует об отсутствии экзотермических процессов на всём протяжении пиролиза

материала. Термограмма линолеума в окислительной среде представлена на рис. 4.

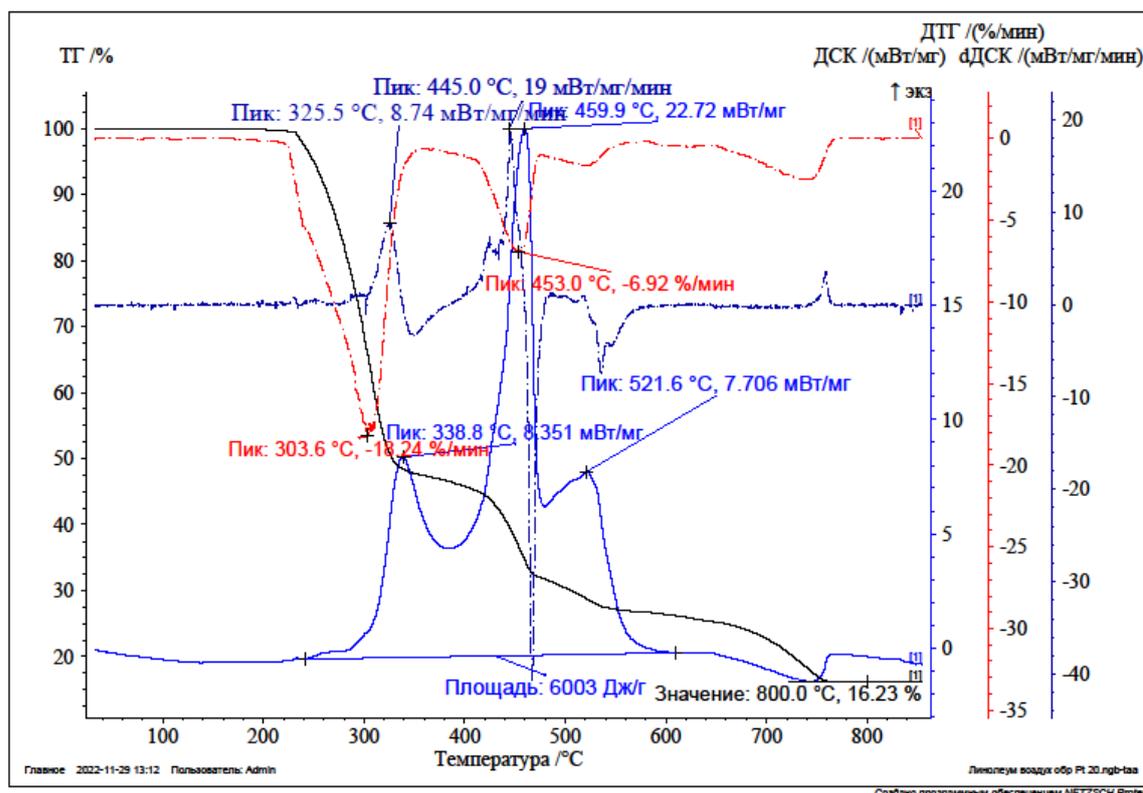


Рис. 4. Термограмма линолеума в окислительной среде воздуха

На термограмме ярко выражен комплексный экзотермический пик в интервале температур 300–550 °С, что свидетельствует о протекании процесса термоокислительной деструкции (горении) исследуемого материала. Экзотермический эффект составил 6 003 Дж/г, скорость (интенсивность) тепловыделения – 3,81 мВт/мг/мин, ЗО при температуре 800 °С – 16,23 %. Наличие

значительного экзотермического эффекта только в окислительной среде и высокая интенсивность тепловыделения свидетельствуют о горючести линолеума. Анализ термолитиза полимерных материалов методом СТА подробно рассмотрен в работе [13].

Термограмма композитного полимерного материала в инертной среде азота представлена на рис. 5.

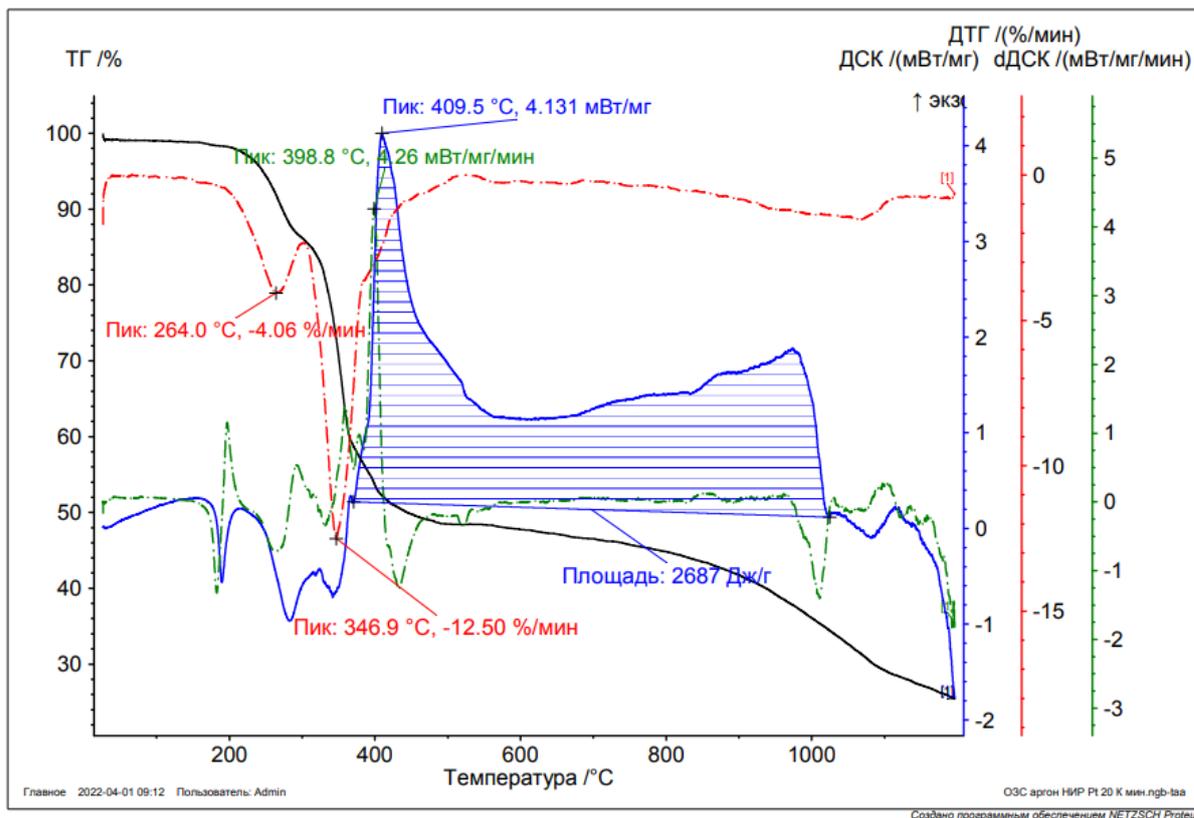


Рис. 5. Термограмма композитного полимерного материала в инертной среде азота

Анализ ДСК-кривой представленной термограммы свидетельствует о протекании экзотермических процессов (2 687 Дж/г) в интервале температур 400–1000 °С, не обусловленных термоокисли-

тельной деструкцией (горением). Экзотермические процессы обусловлены структурированием и карбонизацией образующегося пенококса. Термограмма данного полимера, полученная в среде воздуха, представлена на рис. 6.

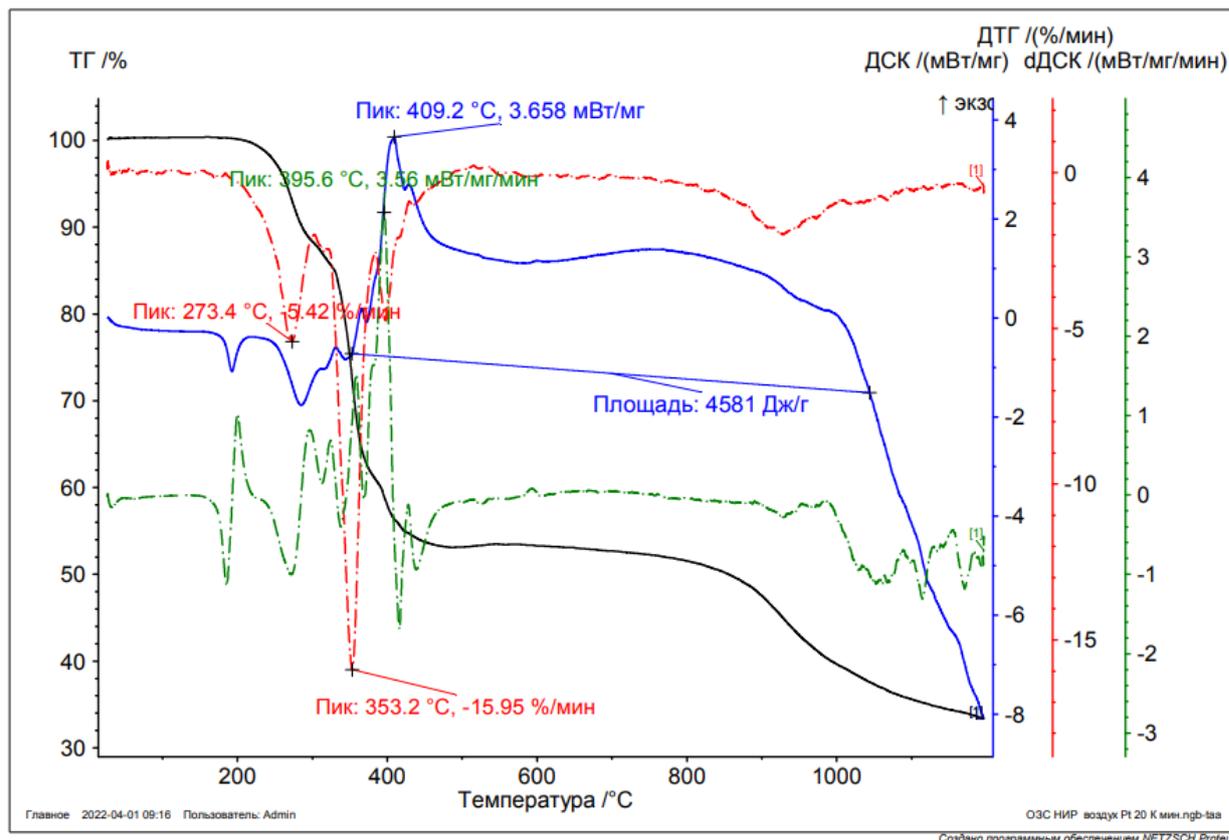


Рис. 6. Термограмма композитного полимерного материала в окислительной среде

Анализ термограммы свидетельствует об экзотермическом эффекте (4581 Дж/г) в интервале температур 400–1000 °С. Экзоэффект за счёт горения составил 1 894 Дж/г, что ниже 2000 Дж/г и в соответствии с ГОСТ Р 57270 – 2016 относится к негорючим материалам. Скорость тепловыделения, не обусловленного горением, составила 3,66 мВт/мг/мин, что даже ниже, чем в инертной среде, то есть в данном случае данная термоаналитическая характеристика не может выступать характеристикой горючести исследуемого материала.

Таким образом, данный пример наглядно демонстрирует необходимость проведения исследований не только в окислительной среде, но и в инертной среде для исключения экзотермических процессов, которые протекают параллельно с термоокислительной деструкцией и дают дополнительный экзотермический эффект, никак не связанный с горючестью материала.

Для наглядности рассмотрим термолит негорючего материала – шпаклёвки гипсовой финишной ROTBAND. Термограмма шпаклёвки гипсовой финишной ROTBAND представлена на рис. 7.

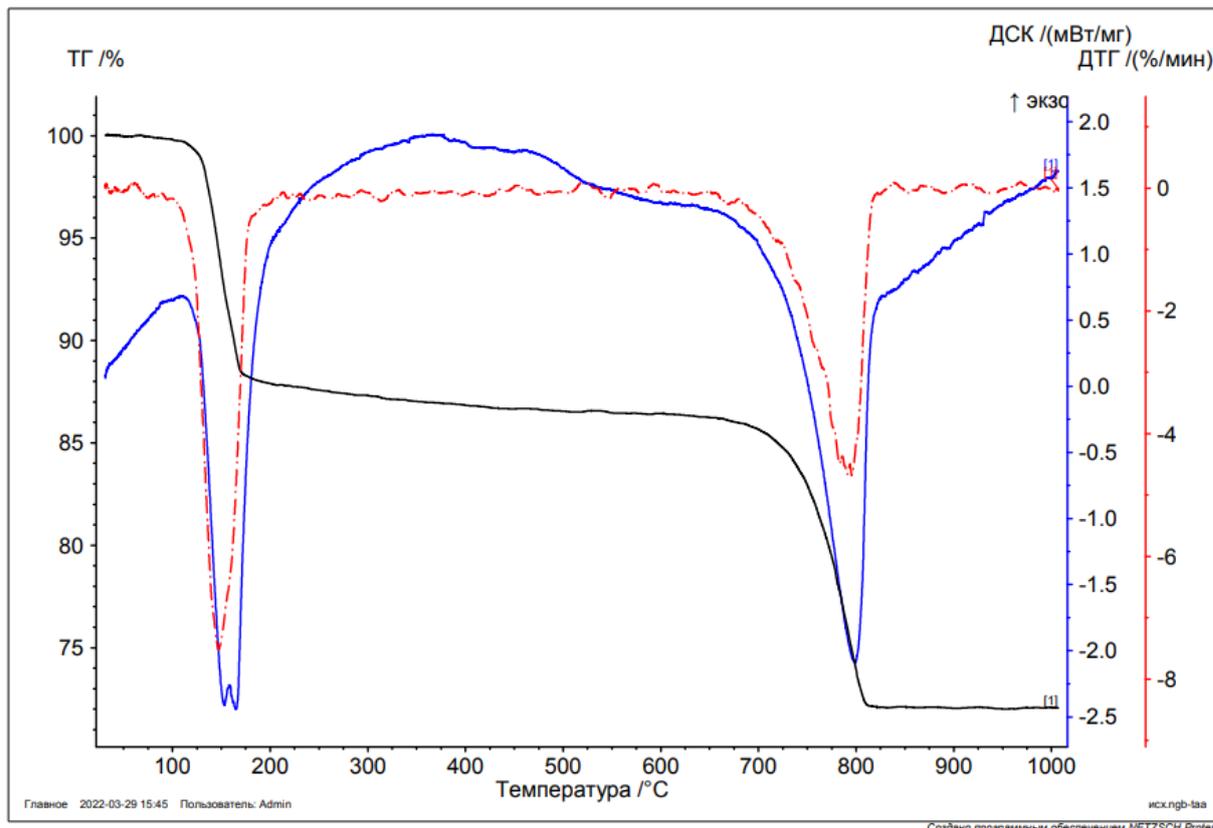


Рис. 7. Термограмма шпаклёвки гипсовой финишной ROTBAND в окислительной среде

Отсутствие экзотермического эффекта даже в окислительной среде свидетельствует о негорючести данного материала. Потеря массы за счёт термического разложения материала и выделения газов составила 27,19 % (30 – 72,81 %).

Полученные в ходе термического анализа термоаналитические кривые

обработаны и проанализированы с использованием программного обеспечения Proteus Thermal Analysis. Результаты проведённых исследований материалов различной химической природы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Термоаналитические характеристики горючести исследуемых материалов

№ п/п	Исследуемый материал	Тепловой эффект, Q, Дж/г		Интенсивность тепловыделения $\frac{dQ}{dt}$, мВт/мг/мин		Коксовый остаток КО, %	Зольный остаток ЗО, %
		Инертная среда	Окислит. среда	Инертная среда	Окислит. среда		
1	Древесина (берёза)	–	11 778	–	7,42	18,34	0,22
2	Линолеум	–	6 003	-	3,81	23,29	16,23
3	Композитный полимер	2 687	4 581	4,26	0	26,41	36,27
4	Шпаклёвка	–	0	–	0	–	78,81

Анализ результатов исследований показал, что наибольшим экзотермическим эффектом в окислительной среде характеризуется древесина. У линолеума теплота горения практически в два раза ниже. При оценке горючести композитного полимера необходимо учитывать, что параллельно с процессом термоокислительной деструкции материала протекают экзотермические процессы, никак не связанные с его горением. Именно для учёта таких процессов и необходимо проводить исследования в инертной среде. Наибольшая интенсивность тепловыделения характерна для древесины.

Потерю массы удобнее оценивать по величине ЗО. Наибольшей потерей массы (наименьшим значением ЗО) характеризуется опять древесина,

наибольшим ЗО, как и следовало ожидать, – шпаклёвка. Однако потеря массы может протекать не только за счёт горения материала, но и за счёт обычного термического разложения с выделением негорючих газов (углекислого газа, паров воды, оксидов серы и других), что свидетельствует о невозможности применения таких характеристик, как ЗО и потеря массы в качестве критериев для оценки горючести исследуемых материалов при отсутствии экзотермического эффекта в окислительной среде.

Для оценки горючести и определения группы горючести исследуемых материалов после проведения испытаний материала необходимо определить количество баллов по каждому из критериев (табл. 2).

Таблица 2

Критерии оценки горючести различных веществ и материалов

Критерии оценки	Значение	Количество баллов
Экзотермический тепловой эффект, Дж/г	≤ 2000	0
	2000 – 3000	1
	3000 – 7000	2
	> 7000	3
Скорость тепловыделения, мВт/мг/мин	$\leq 2,0$	0
	2,0 – 4,0	1
	4,0 – 6,0	2
	$> 6,0$	3
Зольный остаток, %	> 80	0
	50 – 80	1
	20 – 50	2
	< 20	3

Для сравнения с результатами определения группы горючести исследуемых материалов в соответствии с ГОСТ

12.1.044 – 2018 предлагается использовать разработанную авторами бальную систему оценки (таблица 3).

Таблица 3

Определение группы горючести материалов

Суммарное количество баллов	Группа горючести
0 – 2	Группа негорючих веществ и материалов
3 – 5	Группа трудногорючих веществ и материалов
> 6	Группа горючих веществ и материалов

Для сопоставления полученных результатов исследований методом СТА с результатами исследований в соответствии с ГОСТ 12.1.044 – 2018 рассчитаны баллы

и определены группы горючести исследуемых материалов. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Оценка горючести различных исследуемых материалов

Критерий оценки	Древесина (берёза)	Линолеум	Композитный полимер
Экзотермический тепловой эффект	3	2	0
Скорость тепловыделения	3	1	0
Зольный остаток	3	3	2
Суммарное количество баллов	9	6	2
Группа горючести	Группа горючих веществ и материалов	Группа трудно горючих веществ и материалов	Группа негорючих веществ и материалов

При оценке горючести композитного полимера по экзотермическому тепловому эффекту учитывался только тепловой эффект, характеризующий процесс термоокислительной деструкции ($4\,581 - 2\,687 = 1\,894$ Дж/г).

Полученные результаты не противоречат результатам метода определения группы горючести в соответствии с 12.1.044 – 2018, что подтверждает возможность применения метода СТА для определения группы горючести материалов, однако, поскольку метод СТА характеризуется высокой точностью (погрешность не превышает 3%), то целесообразно введение более детальной и более точной системы оценки горючести материалов.

Для оценки горючести полимерных и композитных материалов, содержащих полимеры, целесообразно также использовать кислородный индекс, определяемый

методом СТА косвенным путём по величине коксового остатка. Для термопластичных полимеров необходимо также учитывать температуру плавления.

Выводы

Таким образом, исследования материалов различной химической природы в инертной и окислительной средах, а также анализ полученных результатов показали, что в качестве критериев оценки их горючести целесообразно использовать следующие термоаналитические характеристики:

- теплота горения,
- скорость тепловыделения,
- зольный остаток при условии горения материала в окислительной среде (наличия экзотермического пика в окислительной среде).

Предложен методический подход для определения группы горючести материалов методом синхронного термического анализа.

Литература

1. Константинова Н. И., Молчадский О. И., Меркулов А. А. Особенности оценки пожарной опасности полимерных отделочных материалов // *Пожарная безопасность*. 2011. № 1. С. 84–89.
2. Дашко Л. В. и др. Применение методов термического анализа при производстве пожарно-технических экспертиз // *Вестник Восточно-Сибирского института МВД России*. 2012. № 1 (60). С. 59–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23638887> (дата обращения: 20.09.2022).
3. Беззапнная О. В. и др. Исследование пожарной опасности древесины различных пород методами термического анализа // *Техносферная безопасность*. 2021. № 3 (32). С. 43–50.
4. Dan V. et al. Studying the fire hazard properties of multialled carbon nanotubes by the method of synchronous thermal analysis / *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019. No. 693. Pp. 1–6.
5. Беззапнная О. В. и др. Оценка термостойкости текстильных материалов боевой одежды пожарного методом синхронного термического анализа // *Техносферная безопасность*. 2021. № 4 (33). С. 101–112.
6. Аббасов Д. К. и др. Исследование горючести полимерных теплоизоляционных материалов методом синхронного термического анализа // *Актуальные научные исследования: сборник статей VI Международной научно-практической конференции: в 4 ч. Пенза*. 2022. С. 23–25.
7. Дементьев Ф. А., Наймушин Е. В., Минкин Д. Ю. Исследование гипса методом синхронного термического анализа для целей установления температурного режима нагрева // *Технологии техносферной безопасности*. 2013. № 5. С. 1–7.
8. Candelier K. et al. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review // *Annals of Forest Science*. 2016. Vol. 73. Pp. 571–583.
9. Дашко Л. В., Синюк В. Д., Плотникова Г. В. Экспертное исследование цементного камня после высокотемпературного воздействия // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 12. С. 22–32.
10. Беззапнная О. В., Глухих П. А. Исследование процессов термоокислительной деструкции табака методом термического анализа // *Техносферная безопасность*. 2020. № 1 (216). С. 82–88.
11. Головина Е. В., Беззапнная О. В., Акулов А. Ю. Экспериментальные зависимости термоаналитических характеристик, полученных методом термического анализа и огнезащитной эффективности для температурных условий углеводородного горения // *Техносферная безопасность*. 2018. № 4 (2). С. 68–74.
12. Беззапнная О. В., Мансуров Т. Х., Титов С. А. Возможность применения кислородного индекса в качестве критерия оценки термостойкости и горючести огнезащитных составов интумесцентного типа // *Школа молодых учёных и специалистов МЧС России. Материалы юбилейного X форума*. 2020. С. 158–160.
13. Беззапнная О. В., Хабибова К. И. Применение метода термического анализа при идентификации термопластов и реактопластов в рамках пожарно-технической экспертиза // *Техносферная безопасность*. 2022. № 1 (34). С. 85–91.

References

1. Konstantinova N. I., Molchadskij O. I., Merkulov A. A. Osobennosti ocenki pozharnoj opasnosti polimernyh otdelochnyh materialov // *Pozharnaya bezopasnost'*. 2011. № 1. S. 84–89.
2. Dashko L. V. i dr. Primenenie metodov termicheskogo analiza pri proizvodstve pozharno-tekhnicheskikh ekspertiz // *Vestnik Vostochno-Sibirskogo instituta MVD Rossii*. 2012. № 1 (60). S. 59–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23638887> (data obrashcheniya: 20.09.2022).
3. Bezzaponnaya O. V. i dr. Issledovanie pozharnoj opasnosti drevesiny razlichnyh porod metodami termicheskogo analiza // *Tekhnosfernaya bezopasnost'*. 2021. № 3 (32). S. 43–50.
4. Dan V. et al. Studying the fire hazard properties of multialled carbon nanotubes by the method of synchronous thermal analysis / *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019. No. 693. Pp. 1–6.
5. Bezzaponnaya O. V. i dr. Ocenka termostojkosti tekstil'nyh materialov boevoj odezhdy pozharnogo metodom sinhronnogo termicheskogo analiza // *Tekhnosfernaya bezopasnost'*. 2021. № 4 (33). S. 101–112.
6. Abbasov D. K. i dr. Issledovanie goryuchesti polimernyh teploizolyacionnyh materialov metodom sinhronnogo termicheskogo analiza // *Aktual'nye nauchnye issledovaniya: sbornik statej VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 4 ch. Penza*. 2022. S. 23–25.
7. Dement'ev F. A., Najmushin E. V., Minkin D. YU. Issledovanie gipsa metodom sinhronnogo termicheskogo analiza dlya celej ustanovleniya temperaturnogo rezhima nagreva // *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*. 2013. № 5. S. 1–7.
8. Candelier K. et al. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review // *Annals of Forest Science*. 2016. Vol. 73. Pp. 571–583.
9. Dashko L. V., Sinyuk V. D., Plotnikova G. V. Ekspertnoe issledovanie cementnogo kamnya posle vysokotemperaturnogo vozdejstviya // *Pozharovzryvbezopasnost'*. 2015. T. 24. № 12. S. 22–32.
10. Bezzaponnaya O. V., Gluhih P. A. Issledovanie processov termookislitel'noj destrukcii tabaka metodom termicheskogo analiza // *Tekhnosfernaya bezopasnost'*. 2020. № 1 (216). S. 82–88.

11. Golovina E. V., Bezzaponnaya O. V., Akulov A. YU. Eksperimental'nye zavisimosti termoanaliticheskikh harakteristik, poluchennykh metodom termicheskogo analiza i ognezashchitnoj effektivnosti dlya temperaturnykh uslovij uglevodorodnogo goreniya // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2018. № 4 (2). S. 68–74.

12. Bezzaponnaya O. V., Mansurov T. H., Titov S. A. Vozmozhnost' primeneniya kislorodnogo indeksa v kachestve kriteriya ocenki termostojkosti i goryuchesti ognezashchitnykh sostavov intumescentnogo tipa // Shkola molodykh uchyonykh i specialistov MCHS Rossii. Materialy yubilejnogo H foruma. 2020. S. 158–160.

13. Bezzaponnaya O. V., Habibova K. I. Primenenie metoda termicheskogo analiza pri identifikacii termoplastov i reaktoplastov v ramkah pozharno-tehnicheskoy ekspertiza // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2022. № 1 (34). S. 85–91.

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 614.8.084

e.ivanov@amchs.ru

О ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИ ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТЕООБСТАНОВКИ**ON THE APPROACH TO MODELING THE SPREAD OF EMERGENCY CHEMICALLY HAZARDOUS SUBSTANCES, BASED ON DYNAMICALLY TRANSMITTED PARAMETERS OF METEOROLOGICAL CONDITIONS**

*Рыбаков А. В., доктор технических наук, профессор,
Усачева Т. В., кандидат педагогических наук, доцент,
Иванов Е. В., кандидат технических наук,
Шимитило В. Л., кандидат технических наук,
Тимарин А. Н., Колобченков М. А.*

ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России», г. Химки

*Rybakov A., Usacheva T., Ivanov E., Shimitilo V., Timarin A., Kolobchenkov M.
«Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia», Khimki*

В научной статье представлен анализ методики прогнозирования распространения аварийно химически опасных веществ (далее – АХОВ) при авариях на химически опасных объектах (далее – ХОО), а также предложен алгоритм построения облака АХОВ с помощью динамических метеопараметров, передаваемых Росгидрометом. Внедрение предлагаемого подхода, базирующегося на применении методик распространения облака АХОВ без учета изменяющихся параметров, позволяет повысить достоверность прогноза по распространению облака АХОВ.

Ключевые слова: аварийно химические опасные вещества, облако АХОВ, метеоданные, область заражения, динамически изменяющиеся параметры.

The scientific article presents an analysis of the methodology for predicting the spread of chemically hazardous substances (hereinafter referred to as AHS) in accidents at chemically hazardous facilities (hereinafter referred to as HOO), and also proposes an algorithm for constructing a cloud of AHS using dynamic meteorological parameters transmitted by Roshydromet.

The implementation of the proposed approach, based on the application of AHS cloud propagation techniques without taking into account changing parameters, makes it possible to increase the reliability of the forecast for the AHS cloud propagation.

Keywords: emergency chemical hazardous substances, AHOV cloud, weather data, infection area, dynamically changing parameters.

Введение

В настоящее время на территории Российской Федерации, по данным Ростехнадзора, зарегистрировано 5594 ХОО [1]. Ежегодно на рассматриваемых объектах фиксируются аварии, связанные с выбросом опасных веществ, разгерметизацией

оборудования и разрушением технических устройств.

Несмотря на то, что в течение последних пяти лет на рассматриваемых объектах не фиксируются аварии, приводящие к возникновению чрезвычайных ситуаций, объемы обращающихся на производстве

АХОВ, степень износа производственных фондов, изменения в нормативах по жилой застройке обуславливают актуальность решения задачи обеспечения химической безопасности населения.

Правовую основу решения задач химической безопасности населения составляет концепция радиационной, химической и биологической защиты населения, которая, помимо прочего, предусматривает необходимость внедрения новых технологий и методик в области мониторинга радиационной, химической обстановки, определения наличия в окружающей среде АХОВ и радиоактивных веществ, опасных биологических агентов [2].

Решение задач прогнозирования химической обстановки при авариях на ХОО опирается на достаточно подробно проработанный методический аппарат [3 – 5], который, к сожалению, не всегда учитывает то обстоятельство, что обстановка при авариях не формируется одновременно. Так для второго и третьего типов химической обстановки (для АХОВ – перегретых летучих жидкостей с температурой кипения ниже либо близкой к температуре окружающей среды) характерно образование вторичного облака зараженного воздуха [6]. В данном случае закономерности формирования химической обстановки в зоне чрезвычайной ситуации будут определяться прежде всего закономерностями изменения концентрации АХОВ в облаке зараженного воздуха и особенностями его распространения в пространстве [7].

Важным обстоятельством также является и то, что оперативно представленный достоверный прогноз химической обстановки в зоне чрезвычайной ситуации является основой для выработки решений по защите населения.

Цель настоящей статьи – описание подхода по моделированию распространения АХОВ в условиях городской застройки.

Постановка задачи

На особенности формирования зоны химического заражения оказывает

влияние целый ряд факторов, которые условно могут быть объединены в следующие группы:

данные о характеристиках источника опасности (его географическая привязка, тип АХОВ, объем АХОВ, обращающегося на объекте, характеристики мест и условий хранения АХОВ);

сведения об аварии (степень разрушения объекта либо количество вещества, участвующего в аварии);

метеорологическая обстановка (температура воздуха, скорость и направление ветра, степень вертикальной устойчивости воздуха);

данные о моменте начала аварии (точное время начала выброса АХОВ в окружающую среду) и времени, в течение которого складывается обстановка.

При этом к группе факторов, наиболее значимо влияющих на формирование зоны химического заражения, относят метеорологические. В частности, закономерности распространения облака АХОВ, во многом определяются направлением и скоростью ветра [8] в районе аварии.

Существенную сложность при решении задач прогнозирования представляет тот факт, что для каждого конкретного участка местности будет характерна их большая изменчивость в пространстве и во времени, что обуславливает значительные трудности при разработке моделей прогнозирования химической обстановки. Нормативно утвержденные методики [3, 4] дают несколько упрощенный порядок определения параметров зоны заражения, когда метеорологические параметры для построения зоны принимаются на момент аварии в одной конкретной точке пространства.

В то же время следует отметить, что в настоящее время на территории страны широко развернута сеть наблюдения и лабораторного контроля, позволяющая контролировать состояние приземного слоя атмосферы в полном объеме. Учитывая, что время обновления данных по метеопараметрам составляет от 0,5 до 180 минут, а

погрешность измерений составляет: для направления ветра – до 10 %, для скорости ветра – до 5 %, для температуры воздуха – до 0,5 % [9], – существует возможность построения модели распространения зараженного воздуха фактически в режиме реального времени.

Решение задачи построения достоверной модели прогноза распространения АХОВ будет заключаться в решении задачи следующего вида:

$$Accuracy(y, y^{\text{пред}}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I[y_i = f(x_j)] \rightarrow \max, \quad (1)$$

где y – единичный участок местности, являющийся составной частью зоны химического заражения;

$y^{\text{пред}}$ – единичный участок местности, прогнозируемый как составная часть зоны химического заражения;

n – множество единичных участков местности, составляющих зону химического заражения;

x – множество параметров, влияющих на химическую обстановку.

Такая задача применяется, как правило, при постановке задач бинарной классификации и заключается в приведении к максимуму количества единичных ячеек, правильно отнесенных к заданному классу [8].

Как правило, для своевременной организации оперативных мероприятий по защите населения и территорий от поражающих факторов чрезвычайных ситуаций, вызванных авариями на ХОО, речь идет именно об определении размеров зон химического заражения с учетом изменения химической обстановки во времени.

Решение

В идее предлагаемого алгоритма заложены известные закономерности рас-

пространения АХОВ, достаточно подробно описанные в [4], при этом повышение достоверности прогноза обеспечивается за счет реализации итерационного цикла количественной оценки выброса вредной примеси в атмосферу в единицу времени и их распространения с учетом динамики изменения метеорологической обстановки как в точке выброса, так и во фронте распространяющегося облака зараженного воздуха.

При этом необходимо учитывать, что метеорологическая обстановка в каждой точке пространства может быть определена только на основании интерполяционного расчета по метеорологическим параметрам ближайших метеостанций. Для чего строится координатная сетка (шаг сетки целесообразно определять исходя из густоты сети метеостанций, а также вычислительных мощностей ЭВМ, на которых осуществляется моделирование).

Все исходные данные МЧС России получают от Росгидромета. Сами данные хранятся в *озере данных МЧС России*.

Для определения всей площади распространения облака зараженного воздуха, был использован способ построения через тригонометрические окружности (рис. 1).

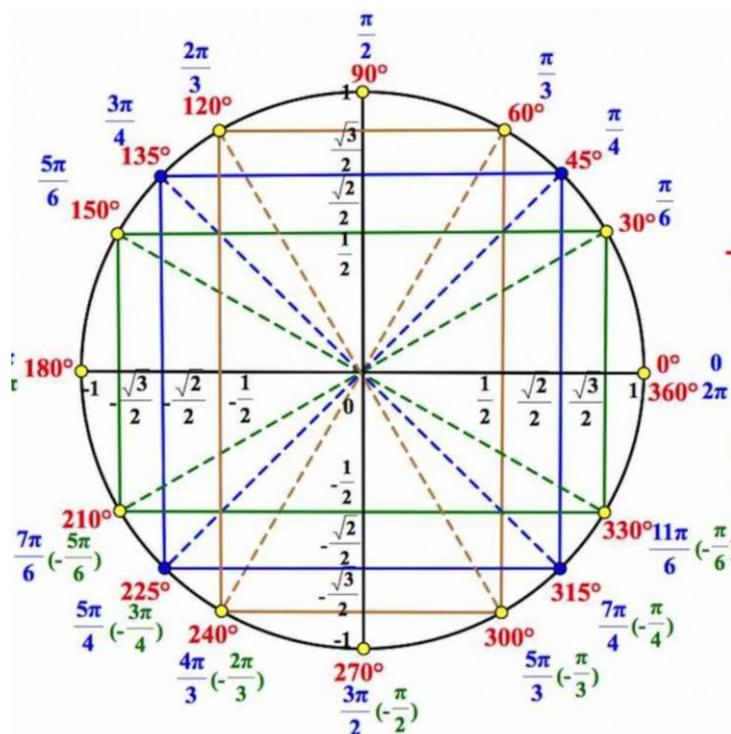


Рисунок 1. – Тригонометрическая окружность

При построении модели предполагаем, что распространение происходит по касательным окружностей до момента,

пока концентрация вещества не станет равна нулю.

Угол направления ветра рассчитывается исходя из следующих условий:

- если $x < 0$ и $y > 0$, то ветер будет направлен: $\pi + \arctg(y/x)$;
- если $x < 0$ и $y < 0$, то ветер будет направлен: $\pi + \arctg(y/x)$;
- если $x > 0$ и $y < 0$, то ветер будет направлен: $3 \cdot (\pi/2) - \arctg(y/x)$;
- если $x = 0$ и $y > 0$, то ветер будет направлен: $\pi/2$;
- если $x = 0$ и $y < 0$, то ветер будет направлен: $3 \cdot \pi/4$;
- если $y = 0$ и $x \geq 0$, то ветер не будет дуть;
- если $y = 0$ и $x < 0$, то ветер будет направлен: $\pi/2$;
- при прочих условиях ветер будет направлен: $\arctg(y/x)$.

Координаты первоначальной точки на окружности выглядят следующим образом:

$$(x_0 - r_1, y_0), \tag{2}$$

где r_1 – радиус первичной окружности.

Далее определяются координаты точек с учетом перемещения по известным углам направления ветра. Исходя из полученных координат, путем сложения векторов, а также используя функции расчета

арктангенса, радиуса угла и условные операторы «else if», высчитывается направление распространения облака зараженного воздуха на плоскости по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} x = x' \cos \varphi - y' \sin \varphi \\ y = x' \sin \varphi - y' \cos \varphi \end{cases} \tag{3}$$

где x, y – координаты конечных точек после поворота;

x', y' – координаты начальных точек поворота;

φ – угол поворота осей координат.

На следующем этапе использованы формулы поворота координатной плоскости вокруг центра осей (в нашем случае – вокруг заданной точки, в которой произошла авария). Поворот координатной плоскости необходим для построения точек будущей окружности. Принятое количество необходимых точек для построения окружности – 32, поскольку при таком количестве окружность имеет наиболее ровные очертания (также обеспечивается требуемая производительность алгоритма пересчета координат). Помимо вышеперечисленных условий выбора количества точек, стоит учитывать тот фактор, что при скорости ветра, близкой к нулю, построение произведется наиболее точно, в соответствии с методикой, изложенной в [4].

Далее производится расчет: второй и последующих окружностей, на основании координат первичной окружности (x_1, y_1); радиуса окружности (r_1); угла распространения зараженного облака (β) (определяется в зависимости от скорости ветра);

глубины распространения вещества (L), а также угол направления ветра (α).

Координаты и радиусы следующих окружностей рассчитываются следующим способом:

$$\begin{aligned} x_2 &= L \cdot \cos(\alpha) + x_1; \\ y_2 &= L \cdot \sin(\alpha) + y_1; \\ r_2 &= L \cdot \sin(\beta/2) + r_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Суть алгоритма представлена на схеме (рис.2).

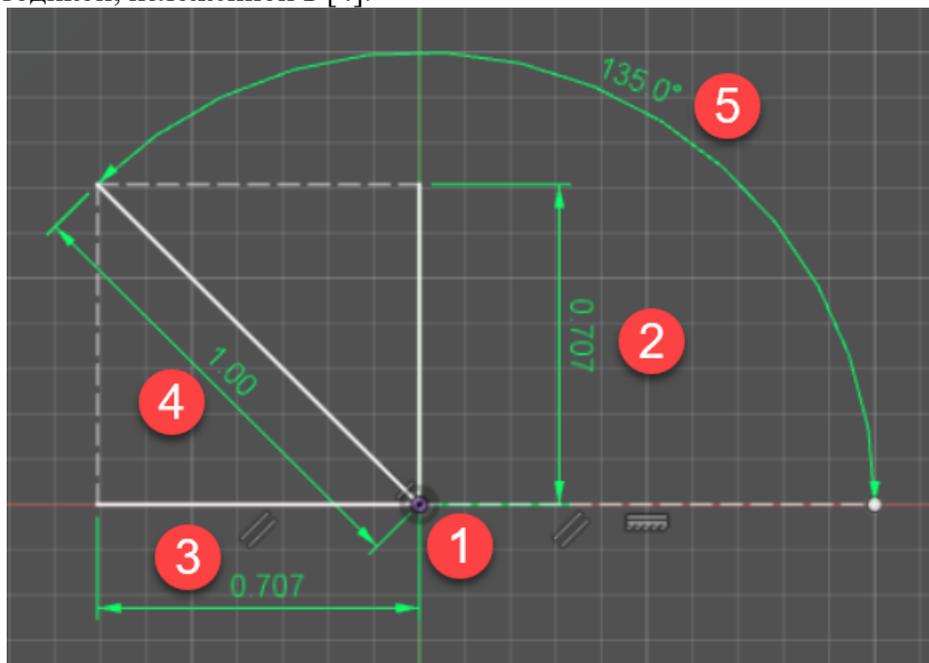


Рисунок 2. Тригонометрическая окружность

В качестве примера приведён северо-западный ветер скоростью 1 м/с. В центре схемы находится точка отсчёта (1). Относительно проведённой горизонтали вправо, против часовой стрелки отсчитывается угол направления ветра в градусах (5). Цифрами 3 и 2 отображают проекции

скорости ветра по осям x и y соответственно. Цифрой 4 обозначен вектор направления ветра на плоскости.

Вычисление точки пересечения касательных с окружностями определяется по формулам 5:

$$\begin{aligned} \mu_+ &= \arctg_2(y_2 - y_1, x_2 - x_1) + \arccos \frac{(r_2 - r_1)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}, \\ \mu_- &= \arctg_2(y_2 - y_1, x_2 - x_1) - \arccos \frac{(r_2 - r_1)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 t_{x1} &= x_1 - r_1 \cdot \cos(\mu_-) \\
 t_{y1} &= y_1 - r_1 \cdot \sin(\mu_-) \\
 t_{x2} &= x_1 - r_1 \cdot \cos(\mu_+) \\
 t_{y2} &= y_1 - r_1 \cdot \sin(\mu_+) \\
 t_{x3} &= x_2 - r_2 \cdot \cos(\mu_+) \\
 t_{y3} &= y_2 - r_2 \cdot \sin(\mu_+) \\
 t_{x4} &= x_2 - r_2 \cdot \cos(\mu_+) \\
 t_{y4} &= y_2 - r_2 \cdot \sin(\mu_+)
 \end{aligned}
 \quad (6)$$

где μ_+ , μ_- – углы пересечения касательных с хордами окружностей;

t_{x1} , t_{y1} , t_{x2} , t_{y2} – координаты точек пересечения с первой окружностью;

t_{x3} , t_{y3} , t_{x4} , t_{y4} – координаты точек пересечения с второй окружностью.

Алгоритм продолжает создавать новые окружности до того момента, пока масса вещества не станет равно нулю. Затем программа выводит конечный результат в виде динамического распространения облака.

На рис. 3 представлен пример реализации предложенного алгоритма на подложке.

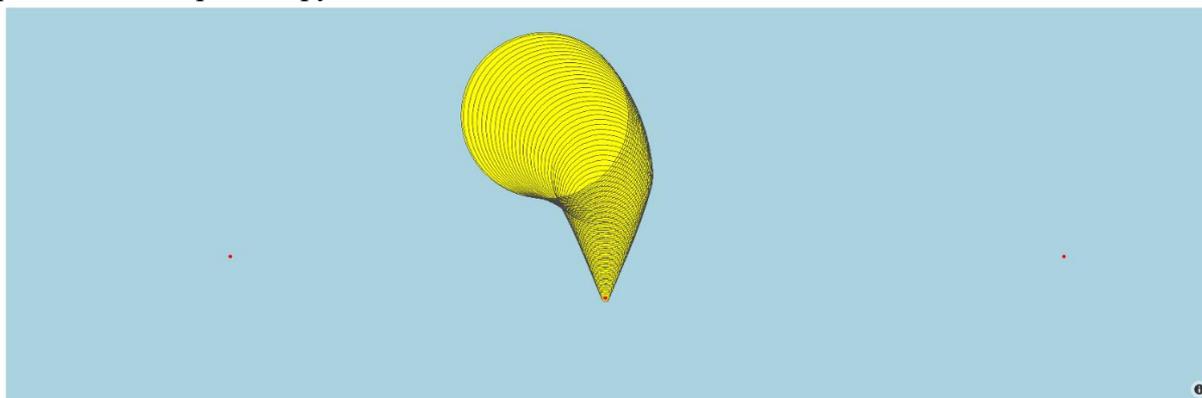


Рисунок 3. Построение облака распространения АХОВ на основе динамических параметров, передаваемых Росгидрометом

Заключение

Предложенный алгоритм позволил разработать универсальную модель прогнозирования последствий аварий, связанных с выбросом АХОВ. По сути такой подход направлен на разработку «практического инструмента», который позволит отобрать наиболее значимые для прогноза

параметры модели с целью минимизации значений ошибки зон заражения на среднесрочном периоде прогнозирования. В свою очередь своевременный и точный прогноз распространения облака АХОВ позволит заблаговременно спланировать мероприятия защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций.

Литература

1. Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2020 году. М., 2021. 369 с.
2. Решение коллегии МЧС России от 04.12.2019 № 8/П «Об утверждении актуализированной редакции Концепции радиационной, химической и биологической защиты населения». URL: <https://docs.cntd.ru/document/564464963?ysclid=14warm616c964352891> (дата обращения: 28.06.2022).
3. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси», редакция 3.1). М., 2005. 67 с.
4. Инженерно-технические мероприятия по гражданской обороне. Актуализированная редакция СНиП 2.01.51-90. СП 165.1325800.2014. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200118578> (дата обращения: 28.06.2022).
5. Методика экспресс-оценки последствий аварийных выбросов (выливов) сильнодействующих ядовитых веществ на промышленных и транспортных объектах. М., 1993. 178 с.
6. Батырев В. В., Живулин Г. А. Основы индивидуальной защиты человека от опасных химических и радиоактивных веществ. М., 2016. 204 с.

7. Матвеев Ю. Н., Стукалова Н. А. Автоматизированное оперативное управление техногенными химико-технологическими объектами при возникновении запроектных аварийных ситуаций // Труды ИСП РАН. 2015. Т. 27. Вып. 6. С. 395–408.

8. Дрига В. Г., Белимов А. И. Влияние метеорологических условий на масштабы и последствия аварий на химически опасных объектах // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1 (10). С. 95–97.

9. Действующие метеорологические станции сети Росгидромета (RU_RIHMI-WDC_2667). URL: http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_2667 (дата обращения: 28.06.2022).

References

1. Godovoj otchet o deyatelnosti federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2020 godu. M., 2021. 369 s.

2. Reshenie kollegii MCHS Rossii ot 04.12.2019 № 8/II «Ob utverzhdenii aktualizirovannoj redakcii Konceptcii radiacionnoj, himicheskoy i biologicheskoy zashchity naseleniya». URL: <https://docs.cntd.ru/document/564464963?ysclid=l4warm616c964352891> (data obrashcheniya: 28.06.2022).

3. Metodika ocenki posledstvij himicheskikh avarij (Metodika «Toksi», redakciya 3.1). M., 2005. 67 s.

4. Inzhenerno-tekhnicheskie meropriyatiya po grazhdanskoj oborone. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.01.51-90. SP 165.1325800.2014. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200118578> (data obrashcheniya: 28.06.2022).

5. Metodika ekspress-ocenki posledstvij avarijnyh vybrosov (vylivov) sil'nodejstvuyushchih yadovityh veshchestv na promyshlennyh i transportnyh ob"ektah. M., 1993. 178 s.

6. Batyrev V. V., Zhivulin G. A. Osnovy individual'noj zashchity cheloveka ot opasnyh himicheskikh i radioaktivnyh veshchestv. M., 2016. 204 s.

7. Matveev YU. N., Stukalova N. A. Avtomatizirovannoe operativnoe upravlenie tekhnogennymi himiko-tekhnologicheskimi ob"ektami pri vozniknovenii zaproektnykh avarijnykh situacij // Trudy ISP RAN. 2015. T. 27. Vyp. 6. S. 395–408.

8. Driga V. G., Belimov A. I. Vliyanie meteorologicheskikh uslovij na masshtaby i posledstviya avarij na himicheski opasnyh ob"ektah // Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnykh situacij. 2019. № 1 (10). S. 95–97.

9. Dejstvuyushchie meteorologicheskije stancii seti Rosgidrometa (RU_RIHMI-WDC_2667). URL: http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_2667 (data obrashcheniya: 28.06.2022).

УДК 614.71

trostyansky2012@yandex.ru

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБЩЕЙ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ
НАСЕЛЕНИЯ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫМИ НОВООБРАЗОВАНИЯМИ,
ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ,
А ТАКЖЕ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ И СМЕРТНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ
ОТ РАКА ЛЕГКИХ**

**STATISTICAL ANALYSIS OF GENERAL INCIDENCE
POPULATION WITH MALIGNANT NEOPLASMS,
DEPENDENCES ON THE CONCENTRATION OF ATMOSPHERIC PURPOSE,
AS WELL AS MORBIDITY AND MORTALITY OF THE POPULATION
FOR LUNG CANCER**

*Тростянский С. Н.¹, доктор технических наук, доцент,
Федянин В. И.¹, доктор технических наук, профессор,
Квашнина Г. А.¹, кандидат технических наук, доцент,
Шмырева М. Б.², кандидат экономических наук,*

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж,

²Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск

Trostyanskiy S.¹, Fedyanin V.¹, Kvashnina G.¹, Shmyreva M.²,

¹Voronezh State Technical University, Voronezh,

²Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk

На основе статистического анализа панельных данных по первичной заболеваемости и смертности населения в районах Воронежской области от рака легких, а также данных по общей заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО) для различных возрастных категорий населения в районах Воронежской области за восьмилетний период наблюдений, а также панельных данных по загрязнению воздушного бассейна в районах Воронежской области регистрируемыми химическими примесями за тот же период наблюдений, построены количественные модели зависимости первичной заболеваемости и смертности населения от рака легких, а также количественные модели зависимости общей заболеваемости ЗНО для различных возрастных категорий населения от концентрации регистрируемых химических примесей в атмосфере. Результаты статистического анализа панельных данных показывают значимую прямую зависимость от величины концентрации в воздухе диоксида серы общей заболеваемости ЗНО детей, а также заболеваемости и смертности населения вследствие рака легких.

Ключевые слова: заболеваемость, злокачественные новообразования, атмосферные примеси, статистический анализ.

Basing on the statistical analysis of the panel data related to the primary morbidity and mortality of the population in the districts of Voronezh region caused by lungs cancer as well as using the data on general disease with malignant neoplasms (MNP) for different age groups in the population of the districts in Voronezh region for the eight years period, including panel data concerning air pollution in the districts of Voronezh region with the registered chemical impurities for the same period of time quantitative models of the primary morbidity and mortality in the population caused by lungs carcinoma were obtained. Moreover, quantitative models of the dependence of the general disease incidence with

MNP in a dependence of the concentration of the registered chemical impurities in the atmosphere were derived for different age groups of the population. Results of statistical analysis for the panel data showed a significant direct dependence of the general disease incidence on the value of sulfur dioxide concentration in the air with MNP among children as well as that one of morbidity and mortality of the population due to lung cancer.

Keywords: morbidity, malignant neoplasms, atmospheric impurities, statistical analysis.

Введение

В работах [1–3] была обнаружена прямая корреляционная зависимость между загрязнением атмосферы антропогенными загрязнителями и динамикой заболеваемости и смертности населения от злокачественных новообразований. Актуально также исследование количественного влияния концентрации атмосферных примесей на уровень общей онкологической заболеваемости населения и на заболеваемость раком легких.

Информационная база исследований

Статистические данные по общей заболеваемости населения злокачественными новообразованиями (ЗНО) были получены из официальной статистики по Воронежской области за период с 2004 г. по 2011 г. для 32 районов области (без учета города Воронежа) и включали отдельно общую онкозаболеваемость детей (до 15 лет), подростков (от 15 до 17 лет), взрослых (от 18 лет и старше). За тот же период времени для соответствующих районов Воронежской области были также составлены статистические данные по первичной заболеваемости и смертности населения от рака

легких, без дифференциации населения по возрасту.

Статистические данные по концентрациям атмосферных примесей в воздухе составлены за период с 2004 г. по 2011 г. на основе статистики ФБУЗ Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области и охватывали те же 32 района Воронежской области. Основными веществами, за которыми осуществлялось наблюдение, являлись: диоксид серы, взвешенные вещества, диоксид азота, оксид углерода, фенол, формальдегид, свинец.

Методика статистического анализа панельных данных

Полагая, что уровни заболеваемости и смертности населения от злокачественных новообразований в районах Воронежской области являются линейными функциями от факторов загрязнения атмосферного воздуха, и объединяя данные по статистике анализируемых районов, воспользуемся моделью со случайными эффектами [4]. Для этого проанализируем уравнения вида (1):

$$Y_{jkit} = a_{1jk} X_{1it} + a_{2jk} X_{2it} + a_{3jk} X_{3it} + a_{4jk} X_{4it} + a_{5jk} X_{5it} + a_{6jk} X_{6it} + a_{7jk} X_{7it} + C_{jk}. \quad (1)$$

В этих уравнениях индекс $j = 0$ соответствует общей заболеваемости населения ЗНО, $j = 1$ – заболеваемости раком легких; индексы i и t соответствуют району и году. Для общей онкозаболеваемости, при $j = 0$, индекс k соответствует трем возрастным группам населения: $k = 1$ – дети (до 15 лет), $k = 2$ – подростки (15–17 лет), $k = 3$ – взрослое население (от 18 лет). Для рака легких, при $j = 1$, индекс $k = 1$ соответствует первичной заболеваемости, а индекс $k = 2$ соответствует смертности от заболевания. Зависимые переменные в уравнениях (1): Y_{jkit} – при $j = 0$ соответствуют общей онкозаболеваемости населения за 1 год на 10^3 человек, а при $j = 1$ соответствуют заболеваемости или смертности населения от рака легких за 1 год на 10^5 человек. Независимые переменные в уравнениях (1) соответствуют концентрациям следующих атмосферных примесей в $[\text{мг}/\text{м}^3]$: X_{1it} – диоксида азота; X_{2it} – свинца; X_{3it} – формальдегида; X_{4it} – диоксида серы; X_{5it} – взвешенных веществ (пыли); X_{6it} – фенола; X_{7it} – оксида углерода. Константы C_{jk} соответствуют факторам, которые не учитываются в уравнениях (1). Результаты регрессионного анализа уравнений (1) были получены на основе обобщенного метода наименьших квадратов, который реализован, с применением пакета прикладных программ Stata.

Результаты по зависимости общей заболеваемости населения ЗНО от концентрации атмосферных примесей

Из анализа панельных данных обнаружена статистически значимая связь между увеличением общей онкозаболеваемости детей (до 15 лет) и ростом концентрации диоксида серы (SO_2) в атмосферном воздухе. Это следует из того, что коэф-

фициент в уравнении (1), соответствующий влиянию содержания SO_2 в воздухе на общую заболеваемость детей ЗНО:

$a_{401} = 12,93 [\text{мг}/\text{м}^3]^{-1}$, определен со значимостью $p=0,003$, которая соответствует ошибке не более 0,3 %. Так как концентрация SO_2 в воздухе по рассматриваемым районам за указанный период времени составляла в среднем $X_{4cp} = 0,1282 [\text{мг}/\text{м}^3]$ (что в 2,56 раза превышает среднесуточное значение ПДК [4]), вычисляемый прирост общей онкозаболеваемости детей за год, связанный с такой концентрацией SO_2 , составлял в среднем 1,66 заболеваний на 10^3 человек. Учитывая, что процент детей в возрасте до 15 лет, среди населения соответствующих районов Воронежской области в среднем составлял 13,65 %, вычисляемый прирост общей онкозаболеваемости за счёт содержания SO_2 , составлял в среднем 12,16 на 10^3 детей в год. Такое влияние атмосферной примеси SO_2 на общую онкозаболеваемость детей возможно связано с ее резорбтивным [5] действием или коррелирует с другими неучтенными онкогенными факторами, так как согласно [6] диоксид серы не обладает непосредственным канцерогенным потенциалом при ингаляционном воздействии. Для других регистрируемых атмосферных примесей статистические значимости при определении соответствующих коэффициентов в уравнении (1) были незначительными, что предполагает недоказанность статистической связи между концентрациями этих примесей и общей онкозаболеваемостью детей.

Для контингентов населения в других возрастных категориях статистические значимости при определении соответствующих коэффициентов в уравнениях (1) были незначительными, что предполагает недоказанность статистической связи между величиной концентрации регистрируемых атмосферных примесей и общей онкозаболеваемостью населения в этих возрастных категориях.

Такие дифференцированные по возрастным категориям результаты статистической связи общей онкозаболеваемости с

концентраций атмосферных примесей могут быть обусловлены следующими причинами. Во-первых, тем, что детский контингент населения более привязан к местности, по сравнению с более мобильными, старшими контингентами населения. Во-вторых, в развитии онкозаболеваемости старших возрастных групп влияние атмосферных примесей может занимать не доминирующее значение по сравнению с другими онкогенными факторами (курение, вредные условия труда, употребление алкоголя, наличие хронических заболеваний и т. д.).

Результаты по зависимости заболеваемости и смертности населения вследствие рака легких от концентрации атмосферных примесей

Из анализа панельных данных обнаружена статистически значимая зависимость между увеличением первичной заболеваемости и смертности населения от рака легких и ростом концентрации SO_2 в атмосферном воздухе. Это следует из того, что коэффициент в уравнении (1), соответствующий влиянию содержания SO_2 в воздухе на первичную заболеваемость раком легких $a_{411} = 75,77 \text{ [мг/м}^3\text{]}^{-1}$, определен со значимостью $p = 0,000$, которая соответствует ошибке менее 0,1 %, а также то, что коэффициент в уравнении (1), соответствующий влиянию содержания SO_2 в воздухе на смертность от рака легких $a_{412} = 48,91 \text{ [мг/м}^3\text{]}^{-1}$, определен со значимостью $p = 0,001$, которая соответствует ошибке не более 0,1 %. Так как концентрация SO_2 в воздухе по рассматриваемым районам за указанный период времени составляла в среднем $X_{4cp} = 0,1282 \text{ [мг/м}^3\text{]}$, вычисляемый прирост первичной заболеваемости раком легких за год, связанный с такой концентрацией SO_2 , составлял в среднем

9,7 больных на 10^5 человек в год, а вычисляемый прирост смертности от рака легких составлял 6,27 умерших на 10^5 человек в год. Установленное влияние атмосферной примеси SO_2 на заболеваемость и смертность населения от рака легких возможно связано с ее резорбтивным [5] действием или коррелирует с другими неучтенными онкогенными факторами, а также согласуется с результатами работы [7] о положительной взаимосвязи взвешенного кумулятивного воздействия диоксида серы со смертностью от рака легких, подвергшихся воздействию SO_2 , работников целлюлозно-бумажной промышленности.

Для других регистрируемых атмосферных примесей статистические значимости при определении соответствующих коэффициентов в уравнениях (1) были незначительными, что предполагает недоказанность статистической связи между величиной концентрации соответствующих примесей с уровнем заболеваемости и смертности населения от рака легких.

Заключение

На основании результатов анализа панельных данных за восьмилетний период по районам Воронежской области о связи техносферного загрязнения атмосферы с общей онкозаболеваемостью населения, а также с заболеваемостью и смертностью населения от рака легких получена статистически значимая прямая связь между величиной концентрации диоксида серы в атмосферном воздухе и общей заболеваемостью ЗНО детей, а также первичной заболеваемостью и смертностью населения от рака легких. Поскольку основными источниками выбросов SO_2 в атмосферу являются предприятия промышленности и двигатели внутреннего сгорания, использующие содержащее серу топливо, целесообразны дополнительные меры технического и нормативного характера по снижению уровня таких выбросов.

Литература

1. Архипова О. Е. и др. Уровень онкологических заболеваний как индикатор медико-экологической безопасности территорий (на примере Ростовской области) // Вестник южного научного центра. 2013. Т. 9. № 3. С. 7–14.

2. Yeprintsev S. et al. Assessment of the impact of technogenic air pollution on the social processes of large urbanized regions / E3S Web of Conference. 2020. No. 215. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/75/e3sconf_bft2020_03009.pdf (дата обращения: 14.09.2022).

3. Епринцев С. А., Клепиков О. В., Шекоян С. В. Мониторинг социально-экологических условий как механизм обеспечения безопасности населения // Наука юга России. 2021. Т. 17. № 1. С. 74–83.

4. Балтаги, Бади Х. Эконометрический анализ панельных данных. Нью-Йорк, 2008. С. 17–22.

5. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

6. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду (Р 2.1.10.1920-04). М., 2004. 143 с.

7. Lee WJ et al. Mortality from lung cancer in workers exposed to sulfur dioxide in the pulp and paper industry // Environ Health Perspect. 2002. Vol. 110. No. 10. Pp. 991–995.

References

1. Arhipova O. E. i dr. Uroven' onkologicheskikh zabolevanij kak indikator mediko-ekologicheskoy bezopasnosti territorij (na primere Rostovskoj oblasti) // Vestnik yuzhnogo nauchnogo centra. 2013. Т. 9. № 3. С. 7–14.

2. Yeprintsev S. et al. Assessment of the impact of technogenic air pollution on the social processes of large urbanized regions / E3S Web of Conference. 2020. No. 215. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/75/e3sconf_bft2020_03009.pdf (data obrashcheniya: 14.09.2022).

3. Eprincev S. A., Klepikov O. V., Shekoyan S. V. Monitoring social'no-ekologicheskikh uslovij kak mekhanizm obespecheniya bezopasnosti naseleniya // Nauka yuga Rossii. 2021. Т. 17. № 1. С. 74–83.

4. Baltagi, Badi H. Ekonometricheskij analiz panel'nyh dannyh. N'yu-Jork, 2008. С. 17–22.

5. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.01.2021 № 2 «Ob utverzhdanii sanitarnyh pravil i norm SanPin 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya».

6. Rukovodstvo po ocenke riska dlya zdorov'ya naseleniya pri vozdejstvii himicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchih okruzhayushchuyu sredyu (R 2.1.10.1920-04). М., 2004. 143 с.

7. Lee WJ et al. Mortality from lung cancer in workers exposed to sulfur dioxide in the pulp and paper industry // Environ Health Perspect. 2002. Vol. 110. No. 10. Pp. 991–995.

УДК 621.865

bazalt@mail.ru

**ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА РОБОТО-
ТЕХНИКИ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ
РАБОТ**

**FORMATION OF A PERSPECTIVE IMAGE OF ROBOTICS DESIGNED
FOR CARRYING OUT EMERGENCY AND RESCUE OPERATIONS**

*Логинов В.В., канд. техн. наук, доцент,
Вишняков А.В., канд. биол. наук, доцент,
Зубарев И.А., канд. пед. наук, доцент,
Шишкин П.Л.*

Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург

*Loginov V., Vishnyakov A., Zubarev I., Shishkin P.,
The Ural Institute of State Firefighting Service
EMERCOM of Russia, Yekaterinburg*

При решении задач создания образцов робототехнических комплексов (РТК) для различных областей применения необходимо четкое определение решаемых ими задач в этих областях. Формирование технического облика робототехники во многом будет определять эффективность решения задач ее применения, а также позволит конкретизировать задачи, стоящие перед разработчиками и производителями РТК. Текущее состояние разработки и внедрения образцов РТК в практику деятельности подразделений и формирований МЧС России позволяет сделать вывод, что несмотря на достаточно успешные испытания и практическую работу отдельных образцов, в целом нет единого понимания задач, решаемых созданием и внедрением РТК, что не позволяет оформить четкие требования к их разработке, оформленные документально. Разнообразие сфер деятельности МЧС России предполагает разработку и внедрение образцов РТК различного назначения. Такая деятельность потребует значительных усилий коллективов усилий конструкторов и финансовых затрат. Их уменьшение, без ущерба снижения характеристик, возможно только при использовании единых (общих) элементов (модулей), желательно ранее имеющих положительный опыт эксплуатации. Правильное определение круга задач, выполняемых образцом РТК, определение его платформы как основы для разработки и производства, позволят эффективно создавать образцы РТК для решения задач в интересах МЧС России.

Ключевые слова: робототехника, аварийно-спасательные и другие неотложные работы, концепция разработки, технологии проведения, обеспечение безопасности.

When solving the problems of creating samples of robotic systems (RC) for various fields of application, it is necessary to clearly define the tasks they solve in these areas. The formation of the image of robotics will largely determine the effectiveness of solving the problems of its application, and will make it possible to specify the tasks facing the developers and manufacturers of RTK. The current state of the development and implementation of RTK samples in the practice of units and formations of the Ministry of Emergency Situations of Russia allows us to conclude that despite the fairly successful testing and practical work of individual samples, in general there is no common understanding

of the tasks solved by the creation and implementation of the RTK, which does not allow us to draw up clear requirements to their development, documented. A variety of areas of activity of the EMERCOM of Russia involves the development and implementation of RTK samples for various purposes. Such activities will require significant efforts of teams of designers and financial costs. Their reduction, without prejudice to performance degradation, is possible only when using single (common) elements (modules), preferably with previous positive operating experience. The correct definition of the range of tasks performed by the RTK model, the definition of its platform as the basis for development and production, will effectively create RTK samples to solve problems in the interests of the Russian Emergencies Ministry.

Keywords: robotics, rescue and other urgent work, development concept, implementation technologies, security.

Проект Стратегии развития робототехники в Российской Федерации до 2030 года [1] требует определения перечня технологий робототехники, необходимых для первоочередного обеспечения национальной безопасности и технологической независимости России. В задачах, решаемых МЧС РФ, такие технологии могут быть определены в подавляющем большинстве как технологии, применяемые в нескольких сферах государственной и хозяйственной деятельности и поддерживаемые на государственном уровне.

Анализируя сферы деятельности МЧС РФ, в которых может быть использована робототехника [2, 3] можно сделать вывод, что для робототехники в этих сферах необходимо четко указать задачи, ею решаемые, в соответствии с общим текущим развитием науки и технологий. После установления задач определяются основные характеристики (параметры) образца робототехники как показатели возможностей ее применения.

Возможность технического воплощения образца будет оформлена конструкторским заданием, определяющим его технический облик. Под этим термином будем понимать определение массовых, габаритных, скоростных и других характеристик образца, а также наличие, набора выполняемых функций с определенным уровнем автономности.

Сфера деятельности МЧС России требует учета определенных задач при со-

здании РТК и определении его технического облика [4]. Одной из таких задач, требующей применения технических средств, является проведение аварийно-спасательных работ (АСР) и их всестороннее обеспечение. При всем многообразии чрезвычайных ситуаций (ЧС), требующих проведения АСР, можно выделить типовые работы, требующие применения механизмов и техники [5]. К таким работам относятся:

- разведка маршрутов выдвижения аварийно-спасательных формирований и участков (объектов) работ;

- розыск пораженных и извлечение их из поврежденных и горящих зданий, загазованных, затопленных и задымленных помещений, завалов;

- устройство проездов (проходов) в завалах;

- укрепление или обрушение конструкций зданий и сооружений, угрожающих обвалом и препятствующих безопасному движению и проведению АСР.

Данные работы проводятся, как правило, по следующему алгоритму [6]: пешая разведка с использованием технических средств поиска пострадавших, применение ручным механизированным и немеханизированным инструментом, подготовка условий для использования стандартной тяжелой техники (бульдозеров, экскаваторов, подъёмных кранов и т. д.) и процесс с ее использованием. При ведении таких работ должно выполняться важное

условие обеспечения безопасности спасателей и спасаемых.

Это условие вступает в противоречие с условиями проведения работ в возможно короткие сроки и с максимальной рациональностью. Основная нагрузка на спасателей приходится во время поиска пострадавших и других работ, неподходящих для использования тяжелой техники. При их выполнении спасательные команды работают в том числе и с механизированным инструментом, требующим для его применения физических усилий и подготовленных площадок, а также прокладки обеспечивающих коммуникаций от них. Ввод в действие тяжелой техники должен быть обеспечен устройством проездов и расчисткой площадок для ее работы.

Фактически до создания условий привлечения к АСР тяжелой техники работы выполняются с большими физическими нагрузками, что увеличивает время их проведения и количество привлекаемых

спасателей. Для облегчения работы спасателей в этих условиях предлагаются к использованию отдельные образцы техники. Примером такого образца является робот-разрушитель BROKK 330 (рис. 1), разработанный для демонтажа монолитных и армированных конструкций, в том числе и в ограниченных по площади помещениях. Машина имеет массу 4,5 т, комплектуется гидромолотом весом 550 кг с силой удара 800 Дж. Упроченная конструкция позволяет вести работы в тяжелых условиях при повышенной температуре.

Фирмой BROKK предлагается к коммерческому использованию целая линейка роботов-разрушителей массой от 0,4 до 5,1 т, с навесным оборудованием весом от 60 до 600 кг, различных габаритных размеров [7]. Самые маленькие могут помещаться в грузопассажирский лифт, средние проходить по лестничным пролетам, крупные гарантированно перевозятся в кузове грузового трехосного автомобиля.



Рисунок 1. Презентация BROKK 330 на выставке «Комплексная безопасность – 2021»

Следует сказать, что концепция «малого» механизма для работы в ограниченном объеме имеет место и при создании

других образцов техники, для применения в самых широких сферах (рис. 2). Термин «малый» здесь употреблен как меньший по

размерам по сравнению со стандартным механизмом, выполняющим сопоставимые функции.

Уменьшение размеров механизма достигается в основном за счет размещения его органов управления вне собственной конструкции и отказа от использования стандартной автомобильной или гусеничной платформы, предназначенной для обеспечения автономного передвижения.

На основе анализа современных подходов к проектированию РТК можно отметить два основных направления как в России, так и за рубежом [8]:

- разработка РТК на новой технической базе;
- создание унифицированных модулей аппаратуры дистанционного управления для установки на имеющиеся колесные и гусеничные шасси.

Обобщая опыт создания РТК в МЧС России, можно сделать вывод, что для их эффективного использования необходимо применять модульный принцип построения [9], что позволит использовать различное оборудование на стандартном шасси.

Оценивая такие механизмы в качестве основы облика робототехники для выполнения отдельных видов АСР необходимо определить:

- массогабаритные параметры (линейку параметров) рабочей платформы для размещения рабочего механизма и системы его управления;
- номенклатуру оборудования для размещения на рабочей платформе в соответствии с решаемыми задачами;
- степень роботизации механизма как перечень функций, выполняемых без участия или с минимальным участием человека.



Рисунок 2. Обслуживание низкоэтажных конструкций зданий «малым» механизмом

Важно заметить, что определение технического облика изделия должно находиться в рамках достижений отечественных и зарубежных технологий машиностроения и робототехники, нецелесообразно закладывать в технический облик нереальные параметры и сложно решаемые задачи. Сам процесс определения технического облика неоднозначен, в нем возможны ошибки и приемлемый вариант может быть найден только после проведения НИОКР и испытания образцов в реальных условиях проведения АСР. Это потребует достаточно большого времени.

В концепции развития робототехнических комплексов (систем) специального назначения в системе МЧС России до 2030 года [10] уделено внимание созданию роботизированной системы для штатной пожарной и аварийно-спасательной техники. В ней определение «штатная» в некоторой степени сужает спектр возможной разработки образцов РТК, учитывая современные достижения отечественной науки в области робототехники. При этом не подвергается сомнению важность внедрения РТК в практическую деятельность. С учетом вышеизложенного особое значение приобретает использование опыта разработок и

практического применения РТК в сферах деятельности родственных задачам, выполняемым при ведении АСР [11].

При определении массогабаритных параметров (типоразмеров) на начальной стадии определения облика следует ориентироваться на существующие линейки роботизированной техники (например, упомянутой выше фирмы BROKK), выбрав за основу оптимальный. Соотношения типоразмеров (например, отношение длины платформы к её ширине) будут зависеть от характера выполняемых задач.

Анализируя характер работ, проводимых при АСР, можно определить примерный облик робототехники для их проведения.

Многообразие проводимых работ потребует такого же многообразия механизмов. Важно, чтобы они работали в комплексе дополняя и расширяя возможности решения задач, стоящих при ведении АСР. При проведении АСР уже используются универсальные механизмы типа погрузчиков (рис. 3) и разрушителей (рис. 1) (последние управляются дистанционно и имеют определенную роботизацию).



Рисунок 3. Универсальный механизм-погрузчик

Для обеспечения их комплексных действий по выполнению общей задачи необходим механизм-робот на унифицированной платформе с навесным оборудованием (рис. 4), которое должно обеспечивать захват приспособлением манипулятора непосредственно или за такелажное приспособление, закрепляемое спасателями обломков конструкций весом до 200 кг, последующую их погрузку на площадку рабочей платформы и перемещение их в заданное место по безопасной

траектории. Этот механизм можно использовать для погрузки обломков после работы разрушителя на механизм-погрузчик.

Степень роботизации образца должна обеспечивать минимальное участие человека в процессе погрузки обломков и их перемещения в заданное место с последующей разгрузкой.

Оценка эффективности образца робототехники состоит в ответе на вопрос: сколько спасателей она может заменить и на какое время сократить АСР?



Рисунок 4. Концептуальный облик механизма-робота

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод. При обобщении опыта применения технических комплексов, в том числе и с частичной роботизацией, в различных сферах деятельности родственного характера проведения поисково-спасательных и аварийно-спасательных работ наиболее эффективными являются «малые» механизмы, создаваемые на унифицированном шасси (платформе). Такие платформы могут иметь унифицированную не только техническую, но и робо-

техническую часть. Для успешного выполнения задач АСР с использованием робототехники необходимо создание модельного ряда РТК на общей (близко к общей) платформе с различными функциональными возможностями. Одна из таких функциональных возможностей как наиболее характерная рассмотрена в статье. При конструировании важно разрабатывать не только технологии робототехники самих механизмов, но и цифровые технологии, обеспечивающие взаимодействия между механизмами.

Литература

1. Проект Стратегии развития робототехники в Российской Федерации до 2030 года (Разработана министерством Науки и высшего образования Российской Федерации для согласования 25.05.2021 года).
2. Переяслов А. Н. Основные цели и задачи развития робототехнических средств для решения задач МЧС России // I Международная научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности «RoboEmercom»: Сб. материалов конференции. 2021. С. 196–175.
3. Комплексные исследования в области создания и внедрения перспективных робототехнических средств, в том числе развитие учебной базы для подготовки операторов робототехнических комплексов, материально-технической базы для эксплуатации робототехнических комплексов и подходов к технико-экономическому обоснованию рациональности системы испытаний робототехнических комплексов в МЧС России. Этап II. М., 2020. 332 с.
4. Ахмадеев А. И. и др. Система робототехники МЧС России. Состояние и перспективы развития // Технологии гражданской безопасности. 2022. № 2 (72). С. 41–47.
5. Методические рекомендации по применению и действиям нештатных аварийно-спасательных формирований при приведении в готовность гражданской обороны и ликвидации чрезвычайных ситуаций. М., 2005. 395 с.
6. Одинцов Л. Г., Пармонов В. В. Технология и технические средства ведения поисково-спасательных и аварийно-спасательных работ. М., 2004. 232 с.
7. Робот-разрушитель BROKK 330D // Аренда демонтажной техники. URL: <https://udrbrokk.ru/roboty-razrushiteli/brokk/brokk-330d> (дата обращения: 14.05.2022).
8. Варабин Д. А. Подход к проектированию робототехнических комплексов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 1. С. 48–55.
9. Цариченко С. Г. Экстремальная робототехника в МЧС России – задачи и перспективы // ТЕХНИКА I TECHNOLOGIA. 2012. С. 97–105.

10. О концепции развития робототехнических комплексов (систем) специального назначения в системе МЧС России до 2030 года: решение коллегии МЧС России от 10.08.2016 № 16/III. 20 с.

11. Овчинников В. В., Мингалеев С. Г., Жесткова С. Г. Перспективы развития робототехнических комплексов для решения задач единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности. 2018. № 3 (57). С. 4–8.

References

1. Proekt Strategii razvitiya robototekhniki v Rossijskoj Federacii do 2030 goda (Razrabotana ministerstvom Nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii dlya soglasovaniya 25.05.2021 goda).

2. Pereyaslov A. N. Osnovnye celi i zadachi razvitiya robototekhnicheskikh sredstv dlya resheniya zadach MCHS Rossii // I Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya po razvitiyu robototekhniki v oblasti obespecheniya bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti «RoboEmercom»: Sb. materialov konferencii. 2021. S. 196–175.

3. Kompleksnye issledovaniya v oblasti sozdaniya i vnedreniya perspektivnykh robototekhnicheskikh sredstv, v tom chisle razvitiya uchebnoj bazy dlya podgotovki operatorov robototekhnicheskikh kompleksov, material'no-tekhnicheskoy bazy dlya ekspluatatsii robototekhnicheskikh kompleksov i podhodov k tekhniko-ekonomicheskomu obosnovaniyu racional'nosti sistemy ispytaniy robototekhnicheskikh kompleksov v MCHS Rossii. Etap II. M., 2020. 332 s.

4. Ahmadeev A. I. i dr. Sistema robototekhniki MCHS Rossii. Sostoyanie i perspektivy razvitiya // Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti. 2022. № 2 (72). S. 41–47.

5. Metodicheskie rekomendacii po primeneniyu i dejstviyam neshtatnykh avarijno-spasatel'nykh formirovaniy pi privedenii v gotovnost' grazhdanskoj oborony i likvidacii chrezvychajnykh situaciyju. M., 2005. 395 s.

6. Odincov L. G., Paramonov V. V. Tekhnologiya i tekhnicheskie sredstva vedeniya poiskovo-spasatel'nykh i avarijno-spasatel'nykh rabot. M., 2004. 232 s.

7. Robot-razrushitel' BROKK 330D // Arenda demontazhnoj tekhniki. URL: [https:// https://udrbrokk.ru/roboty-razrushiteli/brokk/brokk-330d](https://udrbrokk.ru/roboty-razrushiteli/brokk/brokk-330d) (data obrashcheniya: 14.05.2022).

8. Varabin D. A. Podhod k proektirovaniyu robototekhnicheskikh kompleksov // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskije nauki. 2019. Vyp. 1. S. 48–55.

9. Carichenko S. G. Ekstremal'naya robototekhnika v MCHS Rossii – zadachi i perspektivy // TECHNICA I TECHNOLOGIA. 2012. S. 97–105.

10. О концепции развития робототехнических комплексов (систем) специального назначения в системе МЧС России до 2030 года: решение коллегии МЧС России от 10.08.2016 № 16/III. 20 с.

11. Овчинников В. В., Мингалеев С. Г., Жесткова С. Г. Перспективы развития робототехнических комплексов для решения задач единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности. 2018. № 3 (57). С. 4–8.