

Лемешенко Елена Сергеевна

студент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Тольяттинский государственный университет»,
Институт инженерной и экологической безопасности.

e-mail: el.lemeshenko@yandex.kz

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПЕННОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Аннотация. В работе проведён комплексный анализ перспективных направлений развития автоматических установок пенного пожаротушения (АУПТ), применяемых на промышленных объектах, включая нефтехранилища, химические предприятия и резервуарные парки. Рассмотрены преимущества пенных систем, особенности их конструктивного исполнения, а также ограничения, связанные с эксплуатацией. Особое внимание уделено технологическим аспектам генерации пены различной кратности и классификации дозаторов пенообразователя. Проанализированы существующие методы подачи огнетушащих веществ в резервуары: навесной, подслоный и сквозь слой горючего, с указанием их сильных и слабых сторон. Освещены проблемы инерционности автоматического пенного пожаротушения, нормативные требования к интенсивности подачи пенообразователя и условия его хранения. Обоснована целесообразность использования отечественного оборудования в условиях импортозамещения. Работа акцентирует внимание на необходимости модернизации существующих систем с целью повышения их надёжности и эффективности при тушении пожаров на объектах повышенной пожароопасности.

Ключевые слова: пожарная безопасность; автоматические установки пожаротушения; пенные средства пожаротушения; импортозамещение;

огнетушащие вещества; производственные объекты; противопожарная защита; эффективность тушения пожара; пеногенерация; пожароопасные объекты.

Abstract. This study presents a comprehensive analysis of promising directions for the development of automatic foam fire extinguishing systems (AFFES) used at industrial facilities, including oil storage terminals, chemical plants, and tank farms. The advantages of foam systems, their structural features, and operational limitations are examined. Special attention is given to the technological aspects of generating foam of varying expansion ratios and to the classification of foam proportioning devices. The paper analyzes existing methods of delivering extinguishing agents into tanks such as surface application, sub-surface injection, and through-the-fuel-layer injection highlighting their respective strengths and weaknesses. Issues related to the response delay of automatic foam systems, regulatory requirements for foam agent application rates, and storage conditions are discussed. The study substantiates the relevance of using domestically produced equipment under the conditions of import substitution. Emphasis is placed on the need to modernize existing systems to enhance their reliability and effectiveness in extinguishing fires at high-risk facilities.

Key words: fire safety; automatic fire extinguishing systems; foam fire suppression agents; import substitution; extinguishing agents; industrial facilities; fire protection; fire suppression efficiency; foam generation; fire-hazardous facilities.

Введение. В настоящее время вопросы обеспечения пожарной безопасности на промышленных объектах, особенно относящихся к нефтегазовому комплексу, остаются одними из ключевых в сфере техногенной безопасности. Среди широкого спектра методов борьбы с возгораниями, особое место занимает технология пенного пожаротушения, основанная на использовании огнетушащей пены для изоляции очага горения от доступа

кислорода и последующего охлаждения горючих материалов. Этот способ применяется на объектах с высокой степенью пожарной опасности: нефтебазах, складах ГСМ, химических производствах, автотранспортных предприятиях, морских судах и других объектах, связанных с обращением воспламеняющихся веществ.

Широкое распространение и развитие автоматических установок пенного пожаротушения (АУПТ) в Российской Федерации объясняется их высокой эффективностью при тушении горючих и легковоспламеняющихся жидкостей, несмотря на существующие ограничения по их применению, включая невозможность использования при тушении электроустановок и потенциальный ущерб имуществу. К числу основных преимуществ пенных систем можно отнести способность локализовать очаги горения, высокую кратность пены по сравнению с водой, а также эффективность при тушении пожаров на объектах нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Настоящая статья посвящена анализу принципов действия, конструктивных особенностей, типов оборудования и методов применения систем пенного пожаротушения, в частности в условиях резервуарных парков и других объектов нефтегазового сектора. Кроме того, рассматриваются перспективы развития таких систем, а также нормативные требования, регламентирующие их проектирование и эксплуатацию в современных условиях.

Основная часть. Под пенным пожаротушением понимают способ ликвидации очага возгорания с использованием пены, который применяется на различных промышленных объектах, в т.ч. нефтехранилищах, складах, автотранспортных и химических предприятиях и др. [3].

Направления развития пенных АУПТ в Российской Федерации постепенно развиваются ввиду их неоспоримых преимуществ, несмотря на то что такие установки не могут применяться при тушении электроустановок и

электроприборов, а также могут нанести достаточно большой ущерб имуществу объектов [9]:

- хорошо локализуют возгорания, прекращая доступ воздуха непосредственно к месту горения;

- высокая эффективность при тушении нефтепродуктов на складах ГСМ и прочих объектов нефтехимических, нефтегазовых, нефтеперерабатывающих и других отраслей промышленности;

- объем огнетушащего вещества (далее – ОТВ) при тушении пеной практически в два раза больше, чем если бы объект тушили водой.

Область применения инновационных пенных огнетушащих составов и систем пожаротушения включает [8]:

- машинные отделения для предотвращения возгораний компрессоров, генераторов и прочих агрегатов технологического характера;

- объекты для перемещения горючих и смазочных материалов, а также продуктов нефтяного происхождения;

- морские суда любого типа, в том числе и перевозящие воспламеняющиеся вещества;

- помещения с агрегатами пожарного назначения;

- транспортировочные передвижные объекты с находящимся внутри топливным баком;

- сооружения, в которых хранятся растворители, грунтовки, краска и прочие легковоспламеняющиеся вещества;

- объекты с оборудованием по перекачке нефти.

Основная часть. Общий принцип действия систем пенного пожаротушения заключается в том, что при превышении допустимого порогового значения температуры срабатывает тепловой замок сплинкерной или другой системы и происходит запуск пенного огнетушащего состава. Покрывая площадь, поражённую огнём, пена препятствует доступу кислорода, тем самым происходит охлаждение горящего материала, и огонь быстро гаснет [13].

Технология компрессионной пены обеспечивает формирование однородной мелкоструктурной пены низкой кратности с гарантированным отсутствием в ней остаточной жидкой фазы водного раствора пенообразователя. Благодаря этой особенности пена обладает повышенной адгезией и особыми механическими свойствами, что обеспечивает повышенную эффективность тушения при низкой интенсивности орошения. Технология обеспечивает построение систем пенного пожаротушения, работающих без подвода сетевого электропитания на все расчетное время работы установки [17].

Установка пенного пожаротушения состоит из следующих компонентов: источник водоснабжения, дозатор пены, генератор пены, система подачи воздуха, распределительная сеть с клапанами насадками. При определённых условиях – наличии дыма, высокой температуре – происходит автоматическое включение пожаротушения с целью ликвидации возгорания.

Основной характеристикой пен является кратность K – отношение объёма образующейся пены к объёму жидкости, использованной для её приготовления. Измерение кратности пен позволяет классифицировать их на следующие виды: пеноэмульсии (кратность меньше трёх), пены с низкой кратностью (кратность меньше 20), средnekратные (кратность менее 200), высокократные (более 200) [14].

В современных условиях производители систем пенного пожаротушения предлагают дозаторы, основанные на различных физических принципах, основные виды из которых – это эжекционные, турбодозаторы и пропорциональные (таблица 1).

Таблица 1 – Дозаторы для систем пенного пожаротушения

Дозаторы	Принцип действия	Преимущества	Недостатки
Эжекционный	Пенообразователь втягивается в воду за счет вакуума	Конструктивная простота, невысокая стоимость	Потери давления на выходе из дозатора
Турбодозатор	При протекании воды турбина	Широкий диапазон концентраций	Потери давления на выходе из дозатора

	вращается, ось включает работу объемного насоса, который отбирает пенообразователь и подает его под давлением в трубопровод	растворов, возможность применения на пожаро- и взрывоопасных объектах (отсутствует электропривод)	
Пропорциональный (с баком-дозатором)	Вода заполняет бак, создается давление, пенообразователь из эластичной емкости поступает в дозирующее устройство и смешивается с водой	Возможность получения пены и хранения пенообразователя	Порча пенообразователя, потери за счет сужения дозатора

Анализ данных, приведённых в таблице 1, позволяет прийти к выводу, что кратность пены фиксирована и создаётся за счёт разновидностей механического способа. Это вызывает значительные потери (до 40 %) давления на выходе, что в свою очередь, ведёт к возрастанию мощности насоса на трубопроводе. Кроме того, в рассмотренных системах затруднителен контроль параметров системы [9].

Как указывалось, пенные АУПТ целесообразнее всего применять на производственных и складских объектах и на объектах нефтегазовой отрасли. Последние содержат множество резервуаров с типичными нефтепродуктами (бензинами, дизельным топливом и др.). Множество нефтебаз и нефтеперекачивающих станций не обеспечено достаточной защитой резервуаров в случае их взрывов или пожаров, т. к. это связано с большими капитальными затратами. В то же время если же такое случается, то техника съезжается в достаточно большом количестве и тратит на ликвидацию таких ситуаций большие промежутки времени. С другой стороны, при аварийных ситуациях и крупных пожарах на таких объектах, ущерб можеткратно превышать величину капитальных затрат на АУПТ.

В настоящее время, для тушения резервуаров применяются три способа подачи огнетушащих составов в резервуары:

а) Через борт резервуара в виде навесной струи с помощью пенных стволов, пеносливов [18].

Преимущества данного способа:

– отсутствие врезок в нижний пояс резервуара.

Недостатки:

– разрушение пены при прохождении к поверхности жидкости через горящий паровоздушный слой;

– унос пены при восходящих конвекционных потоках горячих дымовых газов.

– невозможность подачи пены в случае заклинивания плавающей крыши при взрыве парагазовой подушки в резервуаре с образованием глухого пространства [19, 20].

б) Через слой горячего с помощью специального рукава.

Преимущества:

– достаточно быстрая подача пены (относительно двух других способов) на горящую поверхность жидкости.

Основные недостатки:

– разрушение, смятие пены во время движения по рукаву через слой горячего;

– возможны трудности при подаче пены в случае заклинивания плавающей крыши при взрыве парагазовой подушки в резервуаре с образованием «глухого» пространства [4].

в) Подслойный способ пожаротушения.

К преимуществам можно отнести:

– отсутствие недостатков подачи пены сверху, указанных в способах а) и б).

Недостатки:

– разрушение пены при прохождении к поверхности жидкости через слой жидкости;

– при высокой вязкости жидкости пена не попадает на поверхность;

– невозможность подачи пены в случае заклинивания плавающей крыши при взрыве парогазовой подушки в резервуаре с образованием глухого пространства [4];

– невозможность тушения полярных жидкостей и высокооктановых бензинов [10, 11].

Самый главный общий для данных способов недостаток (помимо высокой стоимости строительства и эксплуатации) – инерционность начала процесса тушения. С момента пожара начало тушения для данных способов может составить от 5 до 30 минут. Для автоматических систем время начала тушения составляет 180 с, однако это так же является значительным, так как распространение пожара по поверхности горячей жидкости происходит на 1–2 порядка меньше инерционности систем автоматического пожаротушения.

Малая дальность генераторов пенных средней кратности (далее – ГПС) требует размещать их в непосредственной близости от зоны возможного горения. Прогорание ГПС в течение короткого времени требует ограничивать инерционность установки пожаротушения тремя минутами, что закреплено во всех нормативных документах, как федерального уровня, так и ведомственных [10, 11].

В современных системах пожаротушения резервуарных парков применяется пожаротушение подачей пены на поверхность, так и в слой нефтепродукта. Последний способ обозначается термином подслоное пожаротушение. При этом подслоное пожаротушение так же не лишено недостатков, к которым относятся:

– разрушение пены при прохождении к поверхности жидкости через слой;

– невозможность применение пены при подаче в слой высоковязких нефтепродуктов [5];

– невозможность тушения полярных жидкостей и высокооктановых бензинов [10, 11];

– затруднение подачи пены в случае опрокидывания и заклинивания плавающей крыши при взрыве парогазовой смеси.

Перечисленные способы пожаротушения резервуарных парков имеют свою достаточную эффективность при тушении пожарными подразделениями, однако при автоматическом пожаротушении случаи локализации и ликвидации горения единичны. При этом нормативными документами установлено обязательное устройство систем автоматического пожаротушения для резервуаров объемом более 5000 м³. Хотя нормативными документами установлено время инерционности срабатывания установки автоматического пожаротушения, не превышающее 180 с, практика показывает, что по истечении данного времени элементы установок автоматического пожаротушения на резервуарах либо выходят из строя, либо не могут справиться с развывшимся пожаром [21].

Для резервуаров объемом 30 000 м³ и более дополнительно рекомендуется предусматривают подачу в дистанционном режиме воды на охлаждение крыши и огнепреградителей на дыхательной арматуре.

Расчетную интенсивность подачи раствора пенообразователя для тушения нефти и нефтепродуктов в резервуарах следует принимать по таблицам 2 и 3 [7].

Таблица 2 – Интенсивность подачи пены средней кратности для тушения резервуаров

Вид нефтепродукта	Нормативная интенсивность подачи раствора пенообразователя, л·м ⁻² ·с ⁻¹	
	Фторированные пенообразователи	Пенообразователи общего назначения
Нефть и нефтепродукты с $T_{всп} = 28\text{ °C}$ и ниже и ГЖ, нагретые выше $T_{всп}$	0,05	0,08
Нефть и нефтепродукты с $T_{всп}$ более 28 °C	0,05	0,05
Стабильный газовый конденсат	0,12	0,30
Бензин, керосин, дизельное топливо, полученные из газового конденсата	0,10	0,15

Таблица 3 – Интенсивность подачи пены низкой кратности для тушения резервуаров

Вид нефтепродукта	Нормативная интенсивность подачи раствора пенообразователя, л/(м ² ·с ⁻¹)					
	Пенообразователь фторсодержащий (за исключением AFFF и FFFP)		Пенообразователь фторсинтетический типа AFFF		Пенообразователь фторпротеиновый типа FFFP	
	на поверхность	в слой	на поверхность	в слой	на поверхность	в слой
Нефть и нефтепродукты с $T_{всп} = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже	0,08	0,12	0,07	0,10	0,07	0,10
Нефть и нефтепродукты с $T_{всп}$ более $28\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,06	0,10	0,05	0,08	0,05	0,08
Стабильный газовый конденсат	0,10	0,20	0,10	0,12	0,10	0,14
Бензин, керосин, дизельное топливо, полученные из газового конденсата	0,08	0,12	0,08	0,10	0,08	0,10

Нормативную интенсивность подачи раствора пенообразователя при подаче пены на поверхность горючей жидкости следует увеличивать в 1,5 раза при свободном развитии пожара от 3 до 6 ч; в 2 раза при свободном развитии пожара от 6 до 10 ч и в 2,5 раза при свободном развитии пожара более 10 ч [15].

В установках пенного пожаротушения должно предусматриваться применение низкократной пены, получаемой из фторсинтетических пленкообразующих пенообразователей целевого назначения с температурой замерзания не выше минус $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расчетное количество пенообразователя необходимо определять с учетом заполнения сухотрубных участков. Запас пенообразователя необходимо определять, исходя из суммы основного и резервного расчетного количества пенообразователя для восстановления работоспособности системы пенотушения. Хранение пенообразователя на складе объекта и в установках пенного пожаротушения должно

предусматриваться в концентрированном виде, хранение пенообразователя в виде рабочего раствора не рекомендуется [12].

Каждый линейный ввод установок пожаротушения и водяного охлаждения должен быть оборудован узлом для подачи огнетушащих веществ от передвижной пожарной техники [1].

За расчетную площадь тушения для всех типов вертикальных цилиндрических резервуаров со стационарной крышей необходимо принимать площадь горизонтального сечения основного резервуара [6, 12].

Пенообразователи типов AFFF, AFFF/AR, FFFP и множество других подобных типов (AFFF/AR-LV, FFFP/AR и др.) на основе воздушно-механической пены применяются для тушения пожаров различных классов (например, А, В1, В2 и т. д.), в зависимости от горючих веществ, горение которых нужно остановить. Расшифруем наиболее распространенные их марки [16]:

- AFFF – синтетический фторсодержащий пленкообразующий пенообразователь; приставка «/AR» означает возможность тушения не только водонерастворимых горючих жидкостей, но и водорастворимых;

- FFFP – тоже, что и AFFF, но на протеиновой основе для тушения водонерастворимых жидкостей, способных гореть.

Указанные пенообразователи предназначены для подслоного тушения нефти и нефтепродуктов в резервуарах. Теоретически возможно применение ОТВ типов AFFF, AFFF/AR, FFFP на передвижной технике, но наиболее актуально их применять в системах пожаротушения стационарных промышленных объектов (например, нефтебаз, терминалов и других подобных объектов).

Для получения и подачи пены низкой кратности сверху в резервуар следует применять камеры низкократной пены (КНП). КНП в зависимости от способа подачи должны содержать пеносливыв резервуарные. Количество линейных вводов для системы подачи пены сверху в основной резервуар объемом 10000 м³ и более должно быть не менее двух. Стояки линейных

вводов должны располагаться с разных сторон резервуара и прокладываться снаружи по защитной стенке.

Установка подслоного пожаротушения для резервуаров должна включать:

- пожарный фильтр;
- высоконапорные пеногенераторы;
- разрывные мембраны для подслоного пожаротушения;
- линейные вводы, обратные клапаны, запорную арматуру;
- внутреннюю разводку с пенными насадками, герметизирующими внутреннюю разводку пенопроводов от попадания нефти (нефтепродуктов), для подачи пены в слой нефти или нефтепродукта.

Оборудование и конструктивное исполнение установок подслоного пожаротушения должно обеспечивать:

- предотвращение выхода нефти и нефтепродуктов в период эксплуатации или после срабатывания установки за пределы защитной стенки через линейные вводы системы;
- предотвращение образования взрывоопасных концентраций паров нефтепродукта в линейных вводах при нормальной эксплуатации системы;
- возможность проведения испытаний без подачи пены в резервуар;
- возможность контроля давления до и после высоконапорных пеногенераторов в период испытаний;
- возможность регулировки давления после высоконапорных пеногенераторов до 40 % от рабочего давления для проверки кратности пены при рабочих режимах работы данного оборудования;
- слив остатков раствора пенообразователя и пены из сухотрубных участков.

Насадки для системы подслоного тушения, предназначенные для герметизации внутренней разводки, должны гарантированно вскрываться при подаче пены в слой, а также обеспечивать нормативные скорости истечения пены через них (не более 1 м/с).

Размещение пенных насадков должно предусматривать равномерное распределение пены по поверхности нефти (нефтепродукта).

Размещение внутренней разводки с пенными насадками должно исключать возможность подачи пены в водносолевой слой и слой возможных «парафиновых» отложений. При этом высота расположения выходных отверстий пенных насадков должна превышать максимальный расчетный уровень указанных слоев не менее чем на 0,5 м.

Уклон пенопроводов (вводов) внутри резервуара необходимо предусматривать к центру резервуара.

Размещение пенопроводов внутренней разводки с пенными насадками должно исключать контакт с подвижными элементами резервуаров [2].

Заключение. В линейке оборудования различных производителей есть все необходимые устройства российского производства, для того чтобы на данный момент выполнить требования новых сводов правил, особенно в условиях санкций, когда актуально использовать отечественные противопожарные системы с минимальным набором иностранных комплектующих или в идеале – при отсутствии таковых. Новые нормативные документы – это вызов для всей строительной отрасли: от проектировщиков до производителей оборудования.

Перечисленные способы пожаротушения резервуарных парков имеют свою достаточную эффективность также и при тушении пожарными подразделениями, однако при автоматическом пожаротушении случаи локализации и ликвидации горения единичны.

Пенное пожаротушение в настоящее время является одним из самых применяемых способов ликвидации пожаров, в некоторых отраслях промышленности – единственным из возможных. Вследствие этого состав пен и методы их применения постоянно обновляются. Разрабатываются новые автоматизированные системы пожаротушения и их компоненты, поэтому для выбора необходимого оборудования следует проанализировать все достоинства и недостатки предлагаемых на рынке таких систем пожарной

безопасности как пенные АУПТ.

Список литературы:

[1] Абросимов А.А., Топольский Н.Г., Федоров А.В. Автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих производств. М. : МИПБ МВД России, 1999. 246 с.

[2] Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности. 2-е изд. перераб. М. : Химия, 1979. 368 с.

[3] Деменкова Л.Г., Джаборов Ш.Р., Янгалов А.П. Пенное пожаротушение: особенности в современных условиях // Инновационные технологии в машиностроении. Сборник трудов X Международной научно-практической конференции. 2019. С. 348 – 351. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/55363/1/conference_tpu-2019-C30_p349-352.pdf (дата обращения: 25.02.2025).

[4] Демёхин Ф.В., Таранцев А.А., Белов Д.И. О проблеме тушения пожаров в резервуарах с кольцевой защитной стенкой // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2013. № 2. С. 68 – 75.

[5] Кокорин В.В., Ромнова И.Н., Хафизов Ф.Ш. Проблемы эффективного тушения пожаров вертикальных стальных резервуаров в слой горючего // Нефтегазовое дело. 2012. № 3. С. 255 – 260.

[6] Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности складов нефти и нефтепродуктов» [Электронный ресурс] : Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 г. № 529 (ред. от 09.07.2024) // Консультант плюс: справочно-правовая система.

[7] Оснащение средствами пожаротушения, пожарной техникой и другими ресурсами для целей пожаротушения объектов компании. Стандарт

компаний. М. : Роснефть, 2011. 70 с.

[8] Пенная система пожаротушения: классификация и применение [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spena.ru/articles/pennaya-sistema-pozharotusheniya-klassifikatsiya-i-primenenie/> (дата обращения: 05.06.2025).

[9] Пенное пожаротушение: сферы применения, принцип работы, устройство [Электронный ресурс]. URL: <https://afes.pro/blog/pennoe-pozharotushenie> (дата обращения: 05.06.2025).

[10] Рекомендации по тушению высокооктановых бензинов АИ-92, АИ-95 и АИ-98 в резервуарах. Рекомендации. М. : ВНИИПО, 2009. 9 с.

[11] Рекомендации по тушению полярных жидкостей в резервуарах. Рекомендации. М. : ВНИИПО, 2007. 58 с.

[12] Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках. М. : ГУГПС-ВНИИПО-МИПБ, 1999. [Электронный ресурс] URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/7/7251/> (дата обращения: 05.06.2025).

[13] Система пенного пожаротушения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tempero.ru/articles/sistema-pennogo-pozharotusheniya/> (дата обращения: 05.06.2025).

[14] Терещнев В.В., Смирнов В.А., Семенов А.О. Пожаротушение (справочник). Екатеринбург: Калан, 2014. 472 с.

[15] Терещнев В. В., Терещнев А. В. Управление силами и средствами на пожаре. Учебное пособие. М. : Академия ГПС МЧС России, 2013. 261 с.

[16] Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 1. Пенообразователи для тушения пожаров водорастворимых горючих жидкостей подачей сверху. Общие технические требования и методы испытаний [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 53280.1-2010 : Введ. 01.07.2010. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index/49/49126.htm> (дата обращения: 05.06.2025).

[17] Шварев А.Ю., Смирнов В.А. Компрессионная пена – помощник пожарной охраны // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. 2019. №1 (28). [Электронный ресурс] URL:

science.ru/domains_data/files/07January2019/KOMPRESSIONNAYa%20PENa%20_%20POMOSHNIK%20POZhARNOY%20OHRANY.pdf (дата обращения: 05.06.2025).

[18] Satoh K., Liu N., Xie X.D., Zhou K., Hang-Chun Chen, Wu J.M., Lei J., Lozano J.S. CFD Study of Huge Oil Depot Fires – Generation of Fire Merging and Fire Whirl in Arrayed Oil Tanks // Fire Safety Science. 2011. 10:693-705 January 2011 [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/270152157_CFD_Study_of_Huge_Oil_Depot_Fires_-_Generation_of_Fire_Merging_and_Fire_Whirl_in_7_x_7_Arrayed_Oil_Tanks (date of access: 05.06.2025).

[19] Guan J., Fang J., Zhang D., Wang J., Zhang Y. Experiment Study of Oil Tank Fire Characteristics Dependent on the Opening of Tank Top. [Electronic resource] URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813013271> (date of access: 05.06.2025).

[20] Fu X., Bao Z., Chen T., Xia J., Zhang X., Zhang J., Hu Y. Application of compressed air foam system in extinguishing oil tank fire and middle layer effect [Electronic resource] URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/81109577.pdf> (date of access: 05.06.2025).

[21] Hao Z., Jin-shuo L. The Feasibility Study of Extinguishing Oil Tank Fire by Using Compressed Air Foam System [Electronic resource]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816000849> (date of access: 05.06.2025).