

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2025

Читать онлайн 
Read online 

Лебедь-Шарлевич Я.И., Мамонов Р.А., Савостикова О.Н.

Анализ факторов риска аварий на химически опасных объектах (обзор литературы)

ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью»
Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Аварии на химически опасных объектах (ХОО) представляют серьёзную угрозу здоровью населения и окружающей среде. В условиях роста масштабов химического производства и широкого применения аварийно химически опасных веществ (АХОВ) возрастает потребность в системной оценке рисков на всех этапах жизненного цикла химической продукции.

Цель работы – выявление и анализ факторов риска, обуславливающих возникновение аварий на химически опасных объектах.

Для подготовки обзора проведён поиск научной и нормативной литературы в области оценки химических рисков на предприятиях, использующих опасные химические вещества. Поиск источников осуществлялся в научных базах данных Google Scholar, eLibrary и CyberLeninka. Особое внимание уделено публикациям последних десяти лет (2015–2025 гг.). В отдельных случаях в обзор включали и более ранние источники, если они содержали важные сведения по теме данного обзора. Выявлены основные причины возникновения аварий на различных этапах производства, классифицированы типы инцидентов в зависимости от агрегатного состояния АХОВ и условий их выброса. Отражена роль технических неисправностей, человеческого фактора и природных условий. Показано, что возникновение аварий на химически опасных объектах часто обусловлено совокупностью нескольких взаимосвязанных факторов, которые усиливают друг друга. Для предотвращения аварий на ХОО необходимы строгое соблюдение требований производственной безопасности, постоянный контроль условий труда и состояния оборудования. Химическая безопасность может быть обеспечена только комплексными мерами: техническим переоснащением, подготовкой кадров, совершенствованием нормативной базы и межведомственным взаимодействием. Сочетание этих элементов уменьшит вероятность возникновения аварий и повысит готовность к эффективному реагированию в случае их возникновения.

Ключевые слова: химическая безопасность; аварийно химически опасные вещества; химический риск; техногенные аварии; санитарно-гигиеническая защита; управление безопасностью; обзор

Для цитирования: Лебедь-Шарлевич Я.И., Мамонов Р.А., Савостикова О.Н. Анализ факторов риска аварий на химически опасных объектах (обзор литературы). Гигиена и санитария. 2025; 104(11): 1418–1427. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-11-1418-1427> <https://elibrary.ru/maqjzb>

Для корреспонденции: Лебедь-Шарлевич Яна Ивановна, e-mail: YaSharlevich@cspfmba.ru

Участие авторов: Лебедь-Шарлевич Я.И. – сбор материала и обработка данных, написание текста; Мамонов Р.А. – редактирование; Савостикова О.Н. – редактирование. Все соавторы – концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Государственного задания.

Поступила: 01.08.2025 / Принята к печати: 03.11.2025 / Опубликована: 19.12.2025

Yana I. Lebed-Sharlevich, Roman A. Mamonov, Olga N. Savostikova

Analysis of accident risk factors at chemically hazardous facilities (literature review)

Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation

ABSTRACT

Accidents at chemically hazardous facilities pose a significant threat to public health and the environment. With the growing scale of chemical production and the widespread use of hazardous chemicals, there is a growing need for a systematic risk assessment at all stages of the chemical product life cycle.

The objective of this study was to identify and analyze the risk factors contributing to accidents at chemically hazardous facilities.

To prepare this review, a literature search was conducted for scientific and regulatory publications on the assessment of chemical risks at facilities handling hazardous substances. The search was carried out using scientific databases such as Google Scholar, eLibrary, and CyberLeninka. Special attention was given to reports from the last ten years (2015–2025), although earlier sources were also included if they contained significant information relevant to the topic.

The main causes of accidents at different stages of chemical production were identified, and incident types were classified according to the physical state of the hazardous chemicals and the conditions of their release. The roles of technical malfunctions, human error, and natural factors were highlighted. Accidents at chemically hazardous facilities (CHFs) were shown to result often from a combination of several interrelated factors that can amplify one another.

Preventing such accidents requires strict compliance with industrial safety regulations, continuous monitoring of working conditions, and regular inspection of equipment. Ensuring chemical safety demands a comprehensive approach, including technological modernization, personnel training, regulatory improvements, and interagency cooperation. Combining these elements will reduce the likelihood of accidents and improve preparedness for effective response when they occur.

Keywords: chemical safety; hazardous chemicals; chemical risk; industrial accidents; sanitary protection; safety management; review

For citation: Lebed-Sharlevich Ya.I., Mamonov R.A., Savostikova O.N. Analysis of accident risk factors at chemically hazardous facilities. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(11): 1418–1427. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-11-1418-1427> <https://elibrary.ru/maqjzb> (In Russ.)

For correspondence: Yana I. Lebed-Sharlevich, E-mail: YaSharlevich@cspfmba.ru

Contribution: Lebed-Sharlevich Ya.I. – collection and processing of material, writing a text; Mamonov R.A. – editing; Savostikova O.N. – editing. All authors are responsible for the concept and design of the study, integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study was conducted within the framework of the State Assignment.

Received: August 1, 2025 / Accepted: November 3, 2025 / Published: December 19, 2025

Введение

Индустриализация и высокотехнологичное развитие промышленного производства сопровождаются расширением использования химических веществ, что влечёт за собой рост рисков, связанных с воздействием химических факторов на здоровье человека.

Многие химические соединения по своей природе представляют опасность, являются легковоспламеняющимися, взрывоопасными или токсичными. Производственные процессы в химической промышленности сопряжены с дополнительными факторами риска, такими как работа с оборудованием под высоким давлением и при повышенных температурах, проведение работ на высоте или в замкнутых пространствах [1, 2].

Особенно актуальной эта проблема становится в условиях функционирования предприятий, классифицируемых как химически опасные объекты (ХОО), аварии на которых приводят к чрезвычайным ситуациям техногенного характера. Они могут сопровождаться выбросами большого количества токсичных веществ в окружающую среду, наносить значительный материальный ущерб и приводить к человеческим жертвам [3]. Крупные происшествия угрожают не только работникам предприятий, но и населению прилегающих территорий и часто сопровождаются массовыми отравлениями, эвакуацией жителей и длительными экологическими последствиями [4].

На государственном уровне вопросам химической безопасности уделяется большое внимание. Президентом Российской Федерации утверждены «Основы государственной политики в области обеспечения химической и биологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», которые определяют ключевые направления и приоритеты в данной сфере¹. Снижение риска воздействия опасных химических факторов является одной из ключевых задач в области охраны здоровья и национальной безопасности.

Федеральное медико-биологическое агентство играет важную роль в обеспечении санитарно-гигиенического и эпидемиологического благополучия на объектах с повышенным уровнем риска. В перечень организаций, подлежащих обслуживанию ФМБА России, входят стратегически важные объекты, в том числе предприятия химической, атомной, космической и оборонной промышленности². На этих предприятиях ФМБА осуществляет мониторинг условий труда, проводит оценку химических рисков, организует медико-профилактические мероприятия, направленные на предотвращение чрезвычайных ситуаций (в том числе химических аварий), выявление их причин и ликвидацию последствий, а также реализует профилактические и лечебные мероприятия, направленные на защиту здоровья работников и населения [5].

Важную роль в обеспечении химической безопасности играют мероприятия по оценке и снижению рисков на всех этапах цикла химического производства – от транспортировки и приёмки сырья до упаковки и доставки готовой продукции. Несмотря на строгую регламентацию технологических процессов, аварии с участием аварийно химически опасных веществ (АХОВ) продолжают происходить, что обуславливает необходимость анализа технологических и логистических этапов химического производства для минимизации химических рисков. В связи с этим цель настоящей работы – выявление и анализ факторов риска, приводящих

¹ Указ Президента РФ от 11 марта 2019 г. № 97 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в области обеспечения химической и биологической безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу». Доступно: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72092478/?ysclid=manoo4xmaf422394575>

² Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 августа 2006 г. № 1156-р «Об утверждении перечня организаций и перечня территорий, подлежащих обслуживанию ФМБА России». Доступно: <https://docs.cntd.ru/document/90200038?ysclid=manofil7pd494627561§ion=text>

к авариям на химически опасных объектах. Для подготовки данного обзора проведён поиск научной и нормативной литературы в области оценки химических рисков на предприятиях, использующих опасные химические вещества. Поиск источников осуществлялся в научных базах данных Google Scholar, eLibrary и CyberLeninka.

В качестве поисковых ключевых слов на русском и английском языках использовали термины «химическая безопасность / chemical safety», «аварийно химически опасные вещества / hazardous chemicals», «химические риски / chemical risks», «техногенные аварии / industrial accidents», «фактор опасности / hazardous factor», «этапы химического производства / stages of chemical production». Особое внимание уделялось публикациям последних 10 лет (2015–2025 гг.). В отдельных случаях в обзор включали и более ранние источники, если они содержали важные сведения по теме исследования.

В обзор включены публикации рецензируемых научных журналов и сборников конференций по вопросам промышленной и экологической безопасности, содержащие данные о производственных этапах, причинах химических аварий и сценариях их развития, токсичности АХОВ, особенностях их распространения и мерах по предотвращению и минимизации последствий для здоровья и окружающей среды.

Типы химически опасных объектов

Химически опасные объекты (ХОО) – это объекты, при аварии или разрушении которых могут произойти массовые поражения людей, животных и растений аварийно химически опасными веществами (АХОВ)³. К ним относятся предприятия различных отраслей (химической, нефтехимической, металлургической, текстильной, целлюлозно-бумажной и др.), а также промышленные холодильные установки с аммиаком в качестве хладагента, склады и резервуары с токсичными веществами, очистные станции, где применяют хлор, и объекты военного назначения, связанные с хранением или утилизацией химических боеприпасов. Опасность представляют и железнодорожные узлы, где осуществляют перегрузку и временное хранение ядовитых веществ [6].

На таких объектах АХОВ могут использоваться в производственном цикле как исходное сырьё или реагенты, необходимые для технологического процесса, а также быть побочными соединениями, промежуточными или конечными продуктами химических реакций. Объёмы хранения и применения АХОВ ограничиваются и контролируются в соответствии с требованиями Федерального закона № 116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (ФЗ-116)⁴.

К числу АХОВ относят 34 соединения, представляющих наибольшую угрозу при возникновении техногенных аварий на производственных объектах, среди них аммиак, оксиды азота, диметиламин, сероводород, сероуглерод, диоксид серы, синильная и соляная кислоты, фосген, хлор, фтор, хлорпикрин, окись этилена, соединения, входящие в состав ракетного топлива, фосфорорганические соединения, диоксины и ряд других веществ.

Среди АХОВ наиболее часто встречаются аммиак, хлор и серная кислота. Аммиак используется в холодильных установках промышленного назначения, а также при производстве удобрений, взрывчатых веществ и в химическом синтезе. Хлор находит широкое применение в химической отрасли – его используют при производстве пластмасс, син-

³ Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 22.0.05–2020 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения» (утв. и введён в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 сентября 2020 г. № 644-ст). Доступно: https://53.mchs.gov.ru/uploads/resource/2022-09-13/gost_16630801451614032873.pdf?ysclid=mac74nxplw779951172

⁴ Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». Доступно: <https://base.garant.ru/11900785/>

тетического каучука, отбеливающих и дезинфицирующих средств. Серную кислоту применяют в металлургии, химической промышленности, для очистки нефтепродуктов, в производстве аккумуляторов. Несмотря на свою распространённость, она реже вызывает отравления, однако представляет серьёзную опасность из-за способности вызывать тяжёлые химические ожоги при попадании на кожу и слизистые оболочки [7].

Основные причины и механизмы возникновения аварий на ХОО

Причины аварий на ХОО можно разделить на несколько категорий. К первой относятся поломки оборудования или сбои в работе технологических систем в условиях нормальной эксплуатации. Это может происходить из-за неправильного выбора конструкционных материалов, износа оборудования, выхода из строя систем противоаварийной защиты или потери герметичности ёмкостей и трубопроводов [8]. Во вторую группу включают аварии, вызванные сбоями в работе систем автоматического контроля и регулирования при отклонении технологических параметров от нормы [9]. Третья категория объединяет происшествия, возникшие из-за человеческого фактора (ошибок работников предприятий при выполнении операций, сознательных нарушений правил, несанкционированных действий, слабой культуры промышленной безопасности, недостаточной готовности к чрезвычайным ситуациям и нехватки знаний о свойствах химических веществ) [3, 10, 11]. Четвёртый тип аварий обусловлен воздействием природных факторов, таких как землетрясения, ураганы или наводнения. Кроме того, аварии могут происходить из-за ошибок на этапах проектирования, строительства или изготовления оборудования [1, 12], а также в результате диверсий, терактов или военных действий [13].

При химических авариях значительные объёмы АХОВ могут попадать в окружающую среду в виде газов, паров, аэрозолей и жидкостей, стремительно распространяясь за пределы предприятия-источника и создавая угрозу для близлежащих населённых пунктов и окружающей среды. В результате формируется зона химического заражения – область, в пределах которой токсичные вещества оказывают вредное воздействие. Размер этой зоны зависит от расстояния, на которое распространяется концентрация вещества, превышающая безопасный уровень [7].

Степень опасности химических аварий определяется тем, какими физико-химическими и токсическими свойствами обладают АХОВ, а также их способностью быстро переходить в газообразную фазу и создавать опасные для человека концентрации в воздухе. Летучесть веществ и продолжительность их поражающего действия зависят от температуры кипения. В зависимости от неё АХОВ делятся на три группы. К первой группе относят соединения с температурой кипения ниже минус 40 °С. При аварии они мгновенно испаряются, формируя первичное газовое облако, способное спровоцировать взрыв или пожар, а также резко уменьшить содержание кислорода в воздухе. Это наиболее опасно в замкнутых помещениях. Такое облако сохраняется до тех пор, пока продолжается выброс вещества. Во вторую группу входят вещества с температурой кипения от минус 40 до плюс 40 °С. Они могут находиться как в жидком, так и в газообразном состоянии в зависимости от условий хранения (например, под давлением или при пониженной температуре). В случае утечки эти соединения способны образовываться как первичное, так и вторичное газовое облако, возникающее при испарении жидкости с поверхности разлива. В третью группу включены вещества с температурой кипения выше плюс 40 °С, которые при обычных условиях остаются в жидкой форме. При их разливе основную угрозу представляет длительное загрязнение почвы и грунтовых вод. Кроме того, по мере испарения может образовываться вторичное газовое облако [14].

С учётом особенностей распространения опасных веществ химические аварии подразделяются на четыре типа:

1. аварии с образованием только первичного облака АХОВ происходят при мгновенной разгерметизации ёмкостей или оборудования с газообразными (под давлением) или перегретыми сжиженными веществами. В таких случаях основную опасность представляет кратковременное, но интенсивное ингаляционное воздействие высоких концентраций токсичных газов и паров на организм;

2. аварии с последовательным формированием первичного и вторичного облаков АХОВ типичны для утечек или проливов сжиженных газов (аммиак, хлор и др.) и летучих жидкостей, температура кипения которых ниже температуры окружающего воздуха (окись этилена, фосген, оксиды азота, диоксид серы, синильная кислота и др.). Первичное облако образуется за счёт быстрого испарения части вещества, вторичное возникает позже – в процессе медленного испарения разлившейся жидкости. В подобных случаях основную опасность для человека представляет кратковременное ингаляционное воздействие первичного облака (в течение первых минут) и более длительное воздействие вторичного облака, которое может сохраняться в воздухе на протяжении нескольких часов или суток;

3. аварии с образованием только вторичного облака, возникающие в случае разлива сжиженных газов из изотермических хранилищ, а также жидким веществом, температура кипения которых сопоставима с температурой окружающей среды. Кроме того, вторичное облако может появиться при горении сложных химических соединений, сопровождающемся выбросом опасных веществ (например, удобрений типа нитрофоски, комковой серы и др.);

4. аварии, связанные с загрязнением производственного оборудования, почвы и водных объектов малолетучими жидкостями (фенол, сероуглерод, несимметричный диметилгидразин и др.) или твёрдыми веществами. В этом случае образования токсичных газовых облаков не происходит, основную угрозу представляют контактное воздействие через кожу, а также возможное пероральное попадание вредных веществ в организм [9, 14].

Таким образом, приоритетная опасность для человека при авариях на ХОО – загрязнение воздуха токсичными веществами в приземном слое атмосферы. Масштабы заражения зависят от множества факторов: количества и характеристики вещества, его концентрации и физико-химических свойств, погодных условий (скорости и направления ветра, температуры, влажности воздуха, состояния атмосферы), особенностей ландшафта, а также времени суток [15]. Иллюстрацией потенциальной опасности может служить моделирование последствий возможной аварии на водозаборном узле в Орске (Оренбургская область). При аварийном проливе 25 т хлора возможно образование облака заражённого воздуха площадью более 17 км² с глубиной зоны химического заражения до 24 км, в которую попадает значительная часть городской территории. В таких условиях под угрозой окажется до 90% городского населения. При скорости ветра 3 м/с газовое облако может достичь ближайшего населённого пункта, расположенного в 960 м от места аварии, менее чем за 4 мин [16]. Эти данные подчёркивают необходимость разработки эффективных систем раннего оповещения и оперативных мер защиты населения.

В случае аварий четвёртого типа с разливом жидких АХОВ возможно масштабное загрязнение водных объектов, а также вторичное загрязнение атмосферного воздуха вследствие испарения с поверхности разлива. Если водоёмы используются в качестве источников питьевого водоснабжения, попадание в них АХОВ особенно опасно. Проведённое моделирование последствий разлива фенола на территории ПАО «Орскнефтеоргсинтез» демонстрирует, что при попадании токсиканта в реку Урал может возникнуть чрезвычайная ситуация регионального масштаба. Согласно расчётным данным, загрязнённая вода может достичь водозаборных сооружений Оренбурга в течение 30–60 ч, при этом под угрозой

Классификация химически опасных объектов

Classification of chemically hazardous facilities

Класс опасности Hazard class	Население, которое может оказаться в зоне возможного химического заражения в случае аварии The population that may be in the zone of possible chemical contamination in the event of an accident
I	> 75 тыс. человек (либо более 50% населения данной территории) > 75 000 people (or more than 50% of the local population)
II	40–75 тыс. человек (или 30–50% населения) / 40 000–75 000 people (or 30–50% of the population)
III	< 40 тыс. человек (либо 10–30% населения) / < 40 000 people (or 10–30% of the population)
IV	Зона возможного химического заражения не выходит за пределы территории объекта или его санитарно-защитной зоны The potential contamination zone does not extend beyond the facility or its sanitary protection zone

зой окажется водоснабжение десятков населённых пунктов, расположенных вдоль течения реки. Опасность усугубляется тем, что при хлорировании фенолсодержащей воды образуются хлорфенолы – соединения, токсичность которых в 100–250 раз выше, чем у самого фенола [16].

Химически опасные объекты разделяются на четыре класса в зависимости от масштаба потенциального поражения (см. таблицу) [6].

По состоянию на 2023 г. в Российской Федерации зарегистрировано 5554 ХОО с общим запасом АХОВ более 1 млн тонн. Кроме того, на территории страны расположены 8504 предприятия нефтегазовой отрасли, 3977 нефтехимических и нефтеперерабатывающих комплексов, а также 4004 объекта магистрального трубопроводного транспорта. Многие из перечисленных объектов относятся к I–II классам опасности [17]. Особую тревогу вызывает то, что 148 крупных городов с населением свыше 100 тыс. человек находятся в зонах повышенной химической опасности. Общая площадь потенциально опасных территорий, на которых возможно образование очагов химического заражения, составляет ≈ 300 тыс. км², а численность проживающего в этих зонах населения – 54 млн человек. Значительная часть ХОО расположена в непосредственной близости от жилых районов или даже в городской черте, что существенно повышает риски для граждан [7]. Согласно статистике, в 2022 г. на перечисленных выше объектах суммарно произошло 35 крупных аварий, в 2023 г. – 21 авария [17]. С учётом масштаба потенциальной опасности данный показатель остаётся значительным, несмотря на снижение количества происшествий. Это обуславливает необходимость усиленного контроля эксплуатации и технического состояния ХОО с углублённым анализом причин и факторов, приводящих к возникновению аварий, для предотвращения повторных инцидентов.

Факторы риска на разных этапах химического производства

Одним из условий предотвращения аварий на ХОО и минимизации их последствий является понимание причин возникновения аварийных ситуаций на разных этапах производственного процесса. В целом по месту возникновения химические аварии можно разделить на аварии при транспортировке АХОВ, на объектах их хранения и при технологических процессах.

Транспортировка сырья, реагентов и вспомогательных материалов на предприятие осуществляется железнодорожным, автомобильным или трубопроводным транспортом и является начальной точкой производственного процесса. Перевозятся опасные вещества различных категорий, в том числе концентрированные кислоты, щёлочи, легковоспламеняющиеся жидкости, токсичные и коррозионно-активные соединения. Эти вещества требуют особых условий транспортировки, соблюдения режима температуры и герметичности, применения специализированной тары и оборудования. Перевозка опасных грузов допускается только на специализированном транспорте, а операторы оборудования и водители должны иметь соответствующую квали-

фикацию [18, 19]. Все этапы обращения с АХОВ, в том числе их транспортировка, регламентируются соответствующими нормативными актами [20].

Каждый вид транспортировки сопряжён с характерными рисками. Причины аварийных ситуаций при транспортировке АХОВ автотранспортом или железнодорожными составами могут быть связаны с физико-химическими свойствами груза, ошибками водителей, неисправностью транспортных средств, состоянием дорожного покрытия, погодными условиями и другими факторами окружающей среды. Необходимо регулярно проводить проверки технического состояния транспортных средств для перевозки химических веществ, поскольку отсутствие стандартов безопасности или несоответствие им может быть ключевым фактором рисков при перевозке опасных материалов [21]. При перевозке химических веществ автотранспортом утечки могут происходить из-за повреждённой или изношенной упаковки, а также при неправильной фиксации груза, при железнодорожной перевозке опасных веществ в цистернах риски аварий могут быть связаны с возможной разгерметизацией ёмкостей из-за механических повреждений, перегревом содержимого в жаркую погоду и образованием взрывоопасных паровоздушных смесей [22–24].

При перевозке автотранспортом или железнодорожными составами перечисленные выше факторы могут стать причиной дорожно-транспортных происшествий, в результате которых происходят повреждение цистерн и контейнеров и последующие масштабные разливы АХОВ, их возгорание или взрывы [23, 25]. Так, в феврале 1988 г. под Ярославлем произошла крупная авария: из-за схода с рельсов грузового поезда опрокинулись цистерны с гептилом – токсичным компонентом ракетного топлива. Всего было разлито ≈ 740 л гептила. Из-за смены ветра токсичное облако направилось в сторону жилого района, более 3 тыс. человек оказались в зоне поражения. Ликвидация последствий включала срочную эвакуацию населения, заражённый грунт был вывезен, сожжён и захоронен в могильнике. Однако из-за несвоевременного информирования о характере вещества медицинская помощь была оказана с нарушениями, что стало причиной гибели 58 человек [26].

При трубопроводной транспортировке утечки и аварийные выбросы могут быть вызваны коррозией, механическими повреждениями, дефектами сварных швов, ошибками при прокладке труб, неисправностью запорной и регулирующей арматуры, перепадами давления и температуры [27–29]. Особенно уязвимы надземные трубопроводы, поскольку при нарушении изоляции они подвергаются атмосферной коррозии. Хотя коррозионные повреждения часто носят локальный характер, при отсутствии своевременного реагирования они могут привести к масштабной аварии [9]. Особую опасность представляют скрытые утечки, которые долго остаются незамеченными, вызывая значительное загрязнение окружающей среды [30]. Ярким примером является авария на аммиакопроводе «Тольятти – Одесса» в Воронежской области (июнь 2015 г.). В результате разгерметизации фланцевого соединения было выброшено в окружающую среду ≈ 5 т аммиака, что потребовало эвакуации жителей

ближайшего населённого пункта. Причинами аварии были названы износ трубопровода, находившегося в эксплуатации более 30 лет, использование некачественных материалов при ремонтных работах, а также возможная диверсия. Загрязнение охватило территорию в радиусе 20 км: вблизи источника пострадали растения, произошёл мор рыбы, а концентрации аммиака в воздухе и почве многократно превысили допустимые нормы [31].

После доставки опасных веществ на предприятие начинается этап их приёмки: проверка сопроводительных документов (сертификатов, паспортов безопасности, накладных), сверка наименования, концентрации, количества, условий хранения и сроков годности. Также проводится визуальный осмотр упаковки на наличие повреждений, следов коррозии или утечек, осуществляется отбор проб для лабораторного анализа [19, 32]. На этом этапе возможны следующие риски:

- ошибки в маркировке или документации, приводящие к неправильной идентификации веществ и, как следствие, к их неправильному хранению и использованию в технологическом процессе;
- нарушение целостности упаковки или неправильное обращение с опасными грузами, что может вызывать утечки, проливы или выбросы вредных веществ в окружающую среду;
- возможность поступления несовместимых по химическим свойствам веществ, что при нарушении правил хранения или выгрузки может спровоцировать химическую реакцию, выделение тепла, газа или образование пожароопасной смеси;
- ошибки персонала при погрузочно-разгрузочных работах, приводящие к разливу или смешению несовместимых веществ, а также при вскрытии тары (например, использование искрящего инструмента рядом с горючимиарами [33]), что может стать причиной взрыва и возгорания;
- неправильный отбор проб, сопровождающийся утечками, разбрзгиванием или контактированием персонала с опасными веществами [34].

Для стабильной работы на предприятиях создаются резервы химических веществ, которых должно хватить минимум на трое суток. В зависимости от размеров производства и логистических схем на крупных заводах, складах и в портовых зонах одновременно может находиться от нескольких тысяч до десятков тысяч тонн АХОВ. Хранение химических веществ осуществляется с учётом их агрегатного состояния на специально оборудованных складах и площадках: жидкости и сжиженные газы хранятся в резервуарах, цистернах, подземных и наземных ёмкостях; твёрдые вещества – в герметичных контейнерах, бочках или мешках; газы – в газольдерах под давлением [12]. Обязательным условием является раздельное хранение несовместимых веществ, которые могут вступать в реакции друг с другом, во избежание опасных реакций (тепловыделение, газообразование, взрывы). Для этого складские площади зонируются по классам опасности и видам материалов⁵.

Основные причины аварий при хранении АХОВ:

- коррозия ёмкостей вследствие воздействия агрессивных сред, что может привести к утечкам и выбросам опасных веществ;
- утечки или испарения летучих и токсичных веществ из-за нарушения герметичности или разгерметизации при переполнении ёмкостей;
- самовозгорание веществ, склонных к окислению или к спонтанному разложению с выделением тепла, особенно при несоблюдении температурного режима и влажности;
- испарение легкоиспаряемых соединений, приводящее к накоплению паров в замкнутых помещениях с последующей возможностью воспламенения или взрыва;

⁵ ГОСТ 12.1.004–9. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. Доступно: <https://06.mchs.gov.ru/deyatelnost/edinye-reestr-normativnyh-pravovyh-aktov-i-normativnyh-dokumentov-po-pozharnoy-bezopasnosti/normativnye-dokumenty-posle-vstupleniya-v-silu-fz-123/gost-12-1-004-91-ssbt-pozharnaya-bezopasnost-obshchie-trebovaniya-s-izmeneniem?ysclid=massc9j0t894681184>

- нарушение операционных процедур в условиях высокой концентрации горючих газов в воздухе;
- неправильное хранение несовместимых веществ;
- ошибки персонала при отборе проб, сливе или переливе, ведущие к проливу или смешению веществ;
- влияние природных факторов – просадки грунта, эрозия почвы и др. [33–35].

Одна из крупнейших чрезвычайных ситуаций на объектах хранения АХОВ – авария на ТЭЦ-3 в Норильске в мае 2020 г. В результате просадки свайного основания и разрушения железобетонного фундамента одного из резервуаров произошла его разгерметизация с последующей утечкой дизельного топлива. Основными причинами ЧС были названы нарушения эксплуатационных норм и природные факторы (таяние вечной мерзлоты). Разгерметизация привела к масштабному разливу горючего, чему способствовали переполнение ёмкости, отсутствие защитной обваловки и неработающая система мониторинга технического состояния резервуаров и утечек топлива. Оперативные меры позволили локализовать основную часть загрязнения, однако инцидент причинил значительный экологический ущерб, признанный на федеральном уровне [36, 37].

В случае разгерметизации резервуара с АХОВ в закрытых помещениях местоположение точки аварии оказывает важное влияние на масштаб загрязнения и риски для здоровья персонала. Наибольшую опасность представляет утечка АХОВ в глубине склада, где из-за ограниченной вентиляции пары вещества могут распространяться во всём объёме помещения, достигая максимальных концентраций [38].

Таким образом, хранение сырья и реагентов требует строго регламентированных условий по температуре, влажности, изоляции, вентиляции и контроля состояния ёмкостей, а также постоянного мониторинга состояния склада и соблюдения правил техники безопасности.

На предприятиях транспортировка химических веществ от складов к производственным линиям осуществляется через специальные транспортные отделения, где также высок риск аварий из-за свойств перевозимых материалов, износа оборудования, разгерметизации или человеческого фактора. На примере моделирования последствий аварийной ситуации для цеха транспортировки аммиака одного из химических предприятий, где обращается более 5000 т вещества, показано, что при образовании трещины в установке (длиной 30 см и шириной 0,5 см) может быть выброшено до 18 т вещества, что приведёт к образованию взрывоопасной зоны объёмом более 170 тыс. м³. Моделирование показало, что распространение паров может охватить значительную территорию, в том числе соседние цеха, создавая угрозу для здоровья персонала и окружающей среды [39].

Производственный процесс на химических предприятиях сочетает связанные друг с другом и проводимые в определённой последовательности химические, физико-химические, физические и механические операции с целью получения из сырья готового продукта и состоит из следующих этапов: подготовка сырья, химические превращения и выделение целевого продукта из реакционной смеси. Во время подготовительного этапа осуществляется специальная обработка сырьевых материалов, направленная на повышение их химической активности и реакционной способности. В этот период также производится дозирование компонентов, от точности которого в значительной степени зависят стабильность и качество выпускаемого продукта. На основном этапе химических превращений в результате одной или нескольких реакций (как последовательных, так и параллельных) образуется целевой продукт химического производства, а также сопутствующие побочные соединения. На заключительном этапе происходит разделение целевого и побочных продуктов [40].

Основные риски и причины аварий на данном этапе могут быть связаны с технологическими процессами, выбросами токсичных, воспламеняющихся или коррозионных продуктов при нарушении герметичности реакционных

установок, сбоями автоматики и человеческим фактором – ошибками в дозировке реагентов, отклонениями от технологических режимов, несанкционированным отключением систем охлаждения или вентиляции.

В технологических системах химических производств основными являются реакционные, тепло- и тепломассообменные, гидродинамические процессы. Наиболее важную роль играют реакционные процессы, поскольку именно они обуславливают основные химические превращения. Отклонение от установленного режима может привести к резкому росту давления и температуры в реакторе, что чревато повреждением оборудования и выбросом токсичных веществ в окружающую среду. Одна из частых причин взрывов на ХОО – нарушение температурного режима [41]. Кроме того, серьёзную угрозу представляет присутствие в реакторе горючих газов (метан, аммиак) вместе с кислородом, поскольку при несоблюдении соотношения реагентов возможно образование взрывоопасной смеси [9].

К тепломассообменным процессам на химически опасных объектах относятся процессы абсорбции. При соблюдении штатных условий такие процессы не приводят к образованию взрывоопасной среды, однако в случае их нарушения (например, при потере вакуума в абсорбционной системе) возможно быстрое выделение газов, что создаёт угрозу воспламенения, взрыва, а также повышает риск отравлений и термических поражений сотрудников.

Теплообменные процессы играют важную роль в обеспечении безопасной работы оборудования. Они используются для отвода тепла от экзотермических реакций, нагрева и испарения жидкостей и газов, конденсации паров, а также для удержания нестабильных соединений в безопасном температурном диапазоне. Сбои в системе теплообмена могут привести к критическому повышению температуры и давления, что создаёт потенциальную угрозу аварии [34, 42].

Гидродинамические процессы сопровождают такие операции, как перекачивание, транспортировка, смешивание, слияние и налив различных химических веществ. Эти действия могут способствовать ускоренному износу оборудования из-за коррозии или эрозии, вызывать утечку при нарушении герметичности, а также приводить к накоплению статического заряда. Особенно опасным элементом считается насосное оборудование, поскольку из-за создаваемого им высокого давления в системе при сбоях возможно возникновение утечек либо гидравлического удара.

Сбои в подаче электроснабжения могут вызвать отказ контрольно-измерительной аппаратуры и систем противоаварийной защиты, а также привести к нарушению установленных технологических параметров и режимов работы оборудования [9].

В процессе химического производства образуются различные отходы: производственные (остатки незадействованных реагентов, технологические шламы и отработанные катализаторы), аварийные (сбросы при авариях, проливы и аварийные ливневые стоки), а также сточные производственные воды (промышленные, охлаждающие и санитарно-бытовые стоки), требующие дальнейшей классификации и обработки. Отходы подразделяются на пять классов опасности по степени вредного воздействия на окружающую среду и токсичности водных вытяжек.

На предприятиях отходы сортируют по классам опасности и передают лицензованным организациям для безопасной транспортировки и утилизации. Утилизация отходов – их использование для изготовления другой продукции или энергии, в том числе повторное применение в промышленности или в сфере оказания услуг. Высокоопасные отходы не перерабатывают, а обеззараживают и захоранивают на специализированных полигонах [43]. Для обеззараживания отходов применяют разнообразные методы: химическую нейтрализацию (перевод агрессивных кислот, щелочей и токсичных солей в менее опасные соединения); биологическую очистку, при которой органические загрязнители, например, фенолы и нефтепродукты,

разлагаются в аэробных и анаэробных биореакторах; термические методы, основанные на высокотемпературной обработке. Для этого используют, например, продукты сгорания топлива, плазменные потоки, СВЧ-нагрев. Продукты термического разложения вступают в химические реакции, образуя менее опасные соединения [44, 45]. Завершающий этап обращения с отходами – захоронение. Ему подлежат вещества I–IV классов опасности, которые невозможно ни сжечь, ни переработать, ни использовать повторно. Такие отходы размещаются на специализированных полигонах, в хранилищах и могильниках, оборудованных многоуровневой системой защитных барьеров [43].

Основные риски и аварийные сценарии при захоронении отходов связаны с недостаточной герметизацией ёмкостей и дефектами мембранных на полигонах и последующей утечкой фильтрата – токсичной жидкости, образующейся в результате разложения отходов. Фильтрат способен проникать в почву и загрязнять грунтовые воды и поверхностные водоёмы, что представляет серьёзную экологическую угрозу. Длительное накопление и миграция по водным и почвенным путям токсичных веществ приводят к их биоаккумуляции в организмах растений и животных, проникновению в пищевые цепи и обуславливают рост заболеваемости населения прилегающих территорий [46, 47]. Также в случае аварийных ситуаций, связанных с возгоранием тела полигона, возможны выбросы в атмосферный воздух различных загрязняющих веществ, в том числе высокоопасных диоксинов и фуранов, образующихся при горении органических отходов, содержащих хлор [48, 49].

Стадия упаковки, хранения и транспортировки готовой продукции к потребителю завершает технологический цикл химического производства и важна как с точки зрения промышленной безопасности, так и для обеспечения надёжной логистики. На этом этапе продукция, полученная в результате химических преобразований и последующей очистки, фасуется в соответствующую тару (канистры, бочки, мешки, баллоны, контейнеры и др.) в зависимости от её агрегатного состояния, токсичности, коррозионной активности, горючести и иных физико-химических свойств [19], маркируется и размещается на складах для временного хранения перед отгрузкой потребителю.

Маркировка грузов должна осуществляться в соответствии с международными и национальными стандартами (ГОСТ 31340–2022⁶), требованиями Технического регламента ЕАЭС⁷, согласованной на глобальном уровне системой классификации опасности и маркировки химической продукции (СГС)⁸ с обозначением по системе UN-классификации опасных грузов, нанесением пиктограммы СГС, указанием мер предосторожности и условий хранения. Производитель также составляет Паспорт безопасности продукта, который, согласно ГОСТ 30333–2007⁹, должен содержать сведения об опасных свойствах вещества или смеси; информацию о производителе или импортере; рекомендации по безопасному обращению, хранению, транспортировке, утилизации продукта; сведения о мерах первой помощи и действиях при аварийных ситуациях. При поставках химической продукции паспорт безопасности включают в состав сопроводительной документации [50].

Хранение готовой продукции требует соблюдения температурных, влажностных и вентиляционных режимов,

⁶ ГОСТ 31340–2022 «Предупредительная маркировка химической продукции. Общие требования». Доступно: <https://docs.cntd.ru/document/1200192188?ysclid=md75t5s7ne437993906>

⁷ Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности химической продукции» (ТР ЕАЭС 041/2017). Доступно: https://eec.eaeunion.org/comission/department/deptexreg/tr/TR_EEU_041_2017.php

⁸ Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals. Доступно: <https://unece.org/transport/dangerous-goods/ghs-rev10-2023>

⁹ ГОСТ 30333–2007 «Паспорт безопасности химической продукции. Общие требования». Доступно: <https://docs.cntd.ru/document/1200189294>

а также строгого соблюдения принципов раздельного размещения веществ, способных вступать во взаимодействие. Разделение складских зон осуществляется по классам опасности, группам совместимости и видам тары.

Основные риски и причины аварий на этом этапе во многом совпадают с рисками, характерными для стадии хранения сырья, описанными выше, к которым относятся:

- разрушение тары из-за механических повреждений, износа материала, коррозии или воздействия агрессивной среды, что может привести к утечкам, проливам или образованию парогазовых смесей;
- нарушение условий хранения, в том числе превышение температуры или влажности, что может привести к деградации вещества, его самонагреванию или самовозгоранию;
- ошибки в маркировке или складской логистике, приводящие к размещению несовместимых веществ в непосредственной близости, что создаёт риск опасных химических реакций;
- несанкционированный доступ, повреждение упаковки при погрузочно-разгрузочных работах, отсутствие контроля сроков хранения и условий вентиляции.

При перевозке готовой химической продукции безопасность обеспечивается соблюдением требований международных и национальных правил перевозки опасных грузов, использованием специализированных транспортных средств (изотермические контейнеры, автоцистерны, контейнеры-цистерны, железнодорожные вагоны с термоизоляцией и системой обогрева и др.), обязательным наличием аварийной документации, маркировки и средств ликвидации возможных утечек [51].

Меры мониторинга рисков и предупреждения аварий

Как правило, возникновение аварий на ХОО обусловлено совокупностью нескольких взаимосвязанных факторов, которые усиливают друг друга [10, 52]. Каскадное развитие событий, при котором первичная авария оказывает физическое воздействие на соседнее оборудование, приводя к его повреждению и возникновению новых аварийных ситуаций, называется эффектом домино. Например, пожар в одном резервуаре может нагреть соседнюю ёмкость и вызвать её взрыв, а выброс осколков от взрыва способен повредить трубопроводы с горючими веществами, провоцируя новые очаги пожара. В результате таких последовательных событий масштабы происшествия существенно увеличиваются как по площади, так и по времени и могут привести к значительно более серьёзным последствиям [53].

Поэтому для предотвращения аварий на ХОО столь важно строгое соблюдение требований производственной безопасности, постоянный контроль условий труда и состояния оборудования, а также применение работниками средств индивидуальной защиты. Важную роль в обеспечении безопасности играют системы газанализа, позволяющие контролировать содержание вредных веществ и уровень кислорода в производственных помещениях. Для этого используются как стационарные устройства, так и переносные приборы, которые позволяют оперативно обнаруживать утечки и предотвращать развитие чрезвычайных ситуаций. Для минимизации риска возникновения аварий из-за неисправностей оборудования необходимы его регулярные проверки и обслуживание [54].

Для своевременного реагирования на аварийные ситуации, вызванные утечками АХОВ, большое значение имеет оснащённость предприятий автоматизированными системами контроля выброса аварийных веществ (АСКАВ). Эти системы позволяют оперативно фиксировать факт выброса, передавать данные в центры управления в кризисных ситуациях (ЦУКС) МЧС России и обеспечивать принятие решений по защите населения и территорий.

По данным исследования, проведённого в Центральном федеральном округе, из 269 химически опасных объектов только 82 (30,4%) оборудованы АСКАВ. Причём лишь

14 объектов (5,2%) обеспечивают прямой вывод информации от системы в экстренные службы, минуя промежуточные уровни управления [55]. Внедрение и расширение сети АСКАВ является важным направлением повышения безопасности на химически опасных объектах и снижения риска для населения в случае чрезвычайных ситуаций.

Заключение

Проведённый анализ аварий на ХОО показал, что к их возникновению приводят разнообразные причины и условия, способствующие развитию чрезвычайных ситуаций, — от технологических сбоев и износа оборудования до человеческого фактора и природных катаклизмов. На каждом этапе обращения с АХОВ, от транспортировки сырья на предприятие до хранения готовой продукции и утилизации отходов, существуют потенциальные риски, способные привести к катастрофическим последствиям для здоровья людей, окружающей среды и инфраструктуры.

Соблюдение требований производственной безопасности, регулярное проведение профилактического технического обслуживания, а также внедрение эффективных систем защиты и управления являются ключевыми факторами предотвращения химических аварий или минимизации их последствий. При этом каждый ХОО требует индивидуального подхода к обеспечению безопасности, который предполагает выявление свойственных ему рисков, разработку системы их мониторинга и контроля, а также организацию своевременного информирования о потенциальных опасностях. Комплексная реализация этих мер позволит снизить вероятность возникновения тяжёлых инцидентов и повысить общий уровень промышленной безопасности. Это будет способствовать снижению риска неблагоприятного воздействия опасных химических факторов на здоровье населения.

Важные аспекты предотвращения химических аварий — качественная подготовка специалистов в области безопасности, а также регулярное обучение персонала технике безопасности и действиям при возникновении аварий.

Кроме того, особое внимание должно быть уделено системному внедрению автоматизированных систем контроля и раннего оповещения, повышению скорости обмена данными между объектами и экстренными службами. Развитие цифровых платформ мониторинга, моделирования последствий аварий и принятия решений в режиме реального времени становится неотъемлемой частью современной стратегии управления химическими рисками.

Важным направлением является совершенствование методического обеспечения, позволяющего моделировать аварийные ситуации и оценивать их последствия, в том числе для здоровья населения, в целях разработки планов мероприятий по реагированию на внештатные ситуации, создания регламентов контроля, направленных на предотвращение и снижение рисков реализации прогнозируемых сценариев. Для полной оценки возможных последствий модели должны учитывать не только процессы, происходящие непосредственно при аварии на предприятии, но и анализ миграции токсичных веществ в компонентах окружающей среды.

Проектирование и эксплуатация химически опасных объектов должны основываться на гигиенических принципах зонирования территорий и установления санитарно-защитных зон. Важную роль играет внедрение инженерных решений, направленных на предотвращение выбросов аварийно химически опасных веществ за пределы промплощадки и их распространения в зоны проживания населения.

Таким образом, лишь комплексный подход может повысить уровень химической безопасности, для чего необходимы техническое переоснащение, кадровая подготовка, совершенствование нормативной базы и межведомственное взаимодействие. Сочетание этих элементов позволит снизить вероятность возникновения аварий и увеличить готовность к эффективному реагированию в случае их возникновения.

Литература

(п.п. 1–3, 8, 10, 11, 13, 21, 24, 33–35, 41, 46–49, 52, 53 см. References)

4. Кипря А.В., Кинжигалиев В.К. Методология определения мер по защите населения при авариях на химически опасных объектах. *Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования*. 2021; (3): 186–9. <https://elibrary.ru/kzvdas>
5. Федеральное медико-биологическое агентство. Защита населения и обслуживаемых территорий. Доступно: <https://fmba.gov.ru/deyatelnost/osnovnye-napravleniya-deyatelnosti/zashchita-naseleniya-i-obsluzhivayemykh-territoriy/>
6. Ковалев С.А., Кузеванов В.С. *Антология безопасности: химическая безопасность*. Омск; 2019.
7. Акимов А.Г., Лемешкин Р.Н., Жекалов А.Н., Бутузов С.В., Фомичев А.В. Ликвидация медицинских последствий химических аварий и катастроф. *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2014; (3): 210–5. <https://elibrary.ru/snwmiv>
9. Седнев В.А. Теоретические положения по обеспечению защиты населения при авариях на химически опасных объектах. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2022; (4): 39–55. <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2022-04-4>
12. Чрезвычайные ситуации на химически опасных объектах. Доступно: https://professia-uc.ru/f/93_chrezvychajnye_situacii_na_himicheski_opasnyh_obektah.pdf?ysclid=manxi5e36u143950748
14. Басуров В.А., Зазнобина Н.И. *Химическая безопасность*. Нижний Новгород; 2016.
15. Гришкин А.А., Решетников В.М., Аржанухин И.О. Пути снижения экологического воздействия на население и территорию при авариях на химически опасных объектах. *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2014; (2): 24–8. <https://elibrary.ru/sqckb>
16. Грошева А.И. Прогнозирование воздействия аварийно химически опасных веществ в районе водозабора промышленных городов центральной восточной зоны Оренбургской области. *Шаг в науку*. 2020; (4): 17–20. <https://elibrary.ru/lhzza>
17. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территории Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2023 году». М.; 2024.
18. ДОПОГ. Европейское соглашение о международной перевозке опасных грузов. Том I. Доступно: https://rosavtovtransport.ru/netcat_files/15/54/20190101_ADR_2019_voll_R.pdf?ysclid=masqz13j5894082411
19. ДОПОГ. Соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов. Том II. Доступно: https://rosavtovtransport.ru/netcat_files/15/54/20190101_ADR_2019_voll_2_R.pdf?ysclid=masqr4u0zh786418865
20. Очкалова А.Р. Особенности и современные проблемы перевозок опасных грузов в России. *Вестник университета*. 2016; (3): 92–6. <https://elibrary.ru/wciett>
22. Панюхин С.Е. К вопросу о возможных причинах и последствиях аварий на химически опасных объектах Нижегородской области. *Теория и практика современной науки*. 2019; (11): 257–60. <https://elibrary.ru/uqolcx>
23. Гарипов Р.Б., Грибанова Н.Ф., Хорзова Л.И., Снарский С.В., Баширзаде Р.Р. Анализ риска аварий при перевозке химически опасных веществ железнодорожным транспортом. В кн.: *Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго- и ресурсосбережение. Материалы 21-й Международной научно-практической конференции. Том I. Выпуск 21*. Ростов-на-Дону; 2019: 360–76. <https://elibrary.ru/qcpem>
25. Синицын В.В., Татаринов В.В., Пруд Ю.В., Кирсанов А.А. Статистика автомобильных перевозок опасных грузов и происшествий. *Технологии техносферной безопасности*. 2018; (4): 24–35. <https://doi.org/10.25257/TTS.2018.4.80.24-35>
26. Браженко Г.Г., Герасимов А.А. Оказание первой медицинской помощи при химической катастрофе в городе Ярославле, 1988 год. В кн.: *Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов*. Екатеринбург; 2023: 1220–5. <https://elibrary.ru/fgpogi>
27. Гафаров Э.Р. Причины утечек на магистральных нефтепроводах. В кн.: *Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей победителей II Международной научно-практической конференции*. Пенза: Наука и Просвещение; 2016: 137–40. <https://elibrary.ru/xgrdd>
28. Рамазанов Р.Р., Кантемиров И.Ф., Гулин Д.А., Махмудова И.Ф. Анализ дефектов технологических трубопроводов и методов их ремонта.
4. Кипря А., Кинжигалиев В. Definition of population protection measures in accidents at chemically hazardous facilities. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya*. 2021; (3): 186–9. <https://elibrary.ru/kzvdas> (in Russian)
5. Federal Biomedical Agency. Protection of population and serviced territories. Available at: <https://fmba.gov.ru/deyatelnost/osnovnye-napravleniya-deyatelnosti/zashchita-naseleniya-i-obsluzhivayemykh-territoriy/> (in Russian)
6. Kovalev S.A., Kuzevanov V.S. *Anthology of Safety: Chemical Safety [Antologiya bezopasnosti: khimicheskaya bezopasnost']*. Omsk; 2019. (in Russian)
7. Akimov A.G., Lemeshev R.N., Zhekalov A.N., Butuzov S.V., Fomichev A.V. Liquidation of medical consequences of chemical accidents and disasters.

References

1. Ahmad S.I., Hashim H., Hassim M.H., Rashid R. Development of hazard prevention strategies for inherent safety assessment during early stage of process design. *Process Saf. Environ. Prot.* 2019; 121(9): 271–80. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.10.006>
2. Azmi M.S., Hanida A.A., Noor D.A.M. Way forward in Process Safety Management (PSM) for effective implementation in process industries. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 2016; 14: 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2016.08.006>
3. Bai M., Qi M., Shu C.M., Reniers G., Khan F., Chen C., et al. Why do major chemical accidents still happen in China: Analysis from a process safety management perspective. *Process Saf. Environ. Prot.* 2023; 176: 411–20. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.040>
4. Kiprya A., Kinzhigaliyev V. Definition of population protection measures in accidents at chemically hazardous facilities. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya*. 2021; (3): 186–9. <https://elibrary.ru/kzvdas> (in Russian)
5. Federal Biomedical Agency. Protection of population and serviced territories. Available at: <https://fmba.gov.ru/deyatelnost/osnovnye-napravleniya-deyatelnosti/zashchita-naseleniya-i-obsluzhivayemykh-territoriy/> (in Russian)
6. Kovalev S.A., Kuzevanov V.S. *Anthology of Safety: Chemical Safety [Antologiya bezopasnosti: khimicheskaya bezopasnost']*. Omsk; 2019. (in Russian)
7. Akimov A.G., Lemeshev R.N., Zhekalov A.N., Butuzov S.V., Fomichev A.V. Liquidation of medical consequences of chemical accidents and disasters.

- Vestnik Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii.* 2014; (3): 210–5. <https://elibrary.ru/snwmiv> (in Russian)
8. Wang Y., Henriksen T., Deo M., Mentzer R.A. Factors contributing to US chemical plant process safety incidents from 2010 to 2020. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2021; 71: 104512. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104512>
 9. Sednev V.A. Analysis of factors affecting the organization protection of the population in case of chemical accidents dangerous objects of Stavropol territory. *Problemy bezopasnosti i chrezychainykh situatsii.* 2022; (4): 39–55. <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2022-04-4>
 10. Wang J., Fan Y., Niu Y. Routes to failure: Analysis of chemical accidents using the HFACS. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2022; 75: 104695. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104695>
 11. Jung S., Pak S., Lee K., Kang C. Classification of human failure in chemical plants: case study of various types of chemical accidents in South Korea from 2010 to 2017. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2021; 18(21): 11216. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111216>
 12. Emergencies at chemically hazardous facilities. Available at: https://professia-uc.ru/f/93_chrezychajnye_situacii_na_himicheski_opasnyh_obekta.html?ysclid=manxi5e36u143950748 (in Russian)
 13. Zhou J., Reniers G., Zhang L. A weighted fuzzy Petri-net based approach for security risk assessment in the chemical industry. *Chem. Eng. Sci.* 2017; 174: 136–45. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.09.002>
 14. Basurov V.A., Zaznobina N.I. *Chemical Safety [Khimicheskaya bezopasnost']*. Nizhny Novgorod; 2016. (in Russian)
 15. Grishkevich A., Reshetnikov V., Arzhanuhin I. Ways to reduce the environmental impact on the population and territories in case of accidents on chemically hazardous objects. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoi zashchity.* 2014; (2): 24–8. <https://elibrary.ru/sqckcb> (in Russian)
 16. Grosheva A.I. Predicting the impact of chemically hazardous substances in the area of water intakes of industrial cities in the central and eastern zones of the Orenburg region. *Shag v nauku.* 2020; (4): 17–20. <https://elibrary.ru/lhzzaf> (in Russian)
 17. State Report «On the State of Population and Territory Protection in the Russian Federation from Natural and Man-Made Emergencies in 2023». Moscow; 2024. (in Russian)
 18. ADR. European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. Volume I. Available at: https://rosavtotransport.ru/netcat_files/15/54/20190101_ADR_2019_voll_R.pdf?ysclid=masqz13j5894082411 (in Russian)
 19. ADR. Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. Volume II. Available at: https://rosavtotransport.ru/netcat_files/15/54/20190101_ADR_2019_voll_R.pdf?ysclid=masqr4u0zh786418865 (in Russian)
 20. Ochkalova A. Characteristics and modern problems of transportation of dangerous cargoes in Russia. *Vestnik universiteta.* 2016; (3): 92–6. <https://elibrary.ru/wciett> (in Russian)
 21. Ghaleh S., Omidvari M., Nassiri P., Momeni M., Lavasani S.M.M. Pattern of safety risk assessment in road fleet transportation of hazardous materials (oil materials). *Saf. Sci.* 2019; 116: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.039>
 22. Panyukhin S.E. To the question about the possible causes and consequences of accidents at chemically hazardous facilities in Nizhny Novgorod region. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki.* 2019; (11): 257–60. <https://elibrary.ru/uqolcx> (in Russian)
 23. Garibov R.B., Gribanova N.F., Khorzova L.I., Snarskii S.V., Bashirzade R.R. Risk analysis of accidents during the transportation of chemically hazardous substances by railway transport. In: *Technosphere Safety, Reliability, Quality, Energy and Resource Saving. Proceedings of the 21st International Scientific and Practical Conference. Volume 1. Issue 21 [Tekhnosfernaya bezopasnost', nadezhnost', kachestvo, energo- i resursosberzhenie. Materialy 21-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Tom 1. Vypusk 21].* Rostov-na-Donu; 2019: 360–76. <https://elibrary.ru/qcnpm> (in Russian)
 24. Yang D., Zheng Y., Peng K., Pan L., Zheng J., Xie B., et al. Characteristics and statistical analysis of large and above hazardous chemical accidents in China from 2000 to 2020. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022; 19(23): 15603. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315603>
 25. Sinyev V.V., Tatarinov V.V., Prus Yu.V., Kirsanov A.A. Statistics of road transportation of dangerous goods and accidents. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti.* 2018; (4): 24–35. <https://doi.org/10.25257/TTS.2018.4.80.24-35>
 26. Brazhenko G.G., Gerasimov A.A. Providing first medical aid during a chemical disaster in Yaroslavl city, 1988. In: *Actual Issues of Modern Medical Science and Healthcare: Collection of Articles of the VIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students [Aktual'nye voprosy sovremennoi meditsinskoi nauki i zdorovookhraneniya: sbornik statei VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i studentov].* Ekaterinburg; 2023: 1220–5. <https://elibrary.ru/fgpogi> (in Russian)
 27. Gafarov E.R. Causes of leaks in main oil pipelines. In: *Fundamental and Applied Scientific Research: Current Issues, Achievements and Innovations. Collection of Articles of the Winners of the II International Scientific and Practical Conference [Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii. Sbornik statei pobeditelei II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii].* Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2016: 137–40. <https://elibrary.ru/xgerdd> (in Russian)
 28. Ramazanov R.R., Kantemirov I.F., Gulin D.A., Makhmudova I.F. Analysis of industrial pipeline defects and methods of their repair. *Neftegazovoe delo.* 2022; 20(2): 78–85. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-2-78-85>
 29. Shaidullin I.N., Radostev R.V., Smelik A.A. Development of corrosion in pipelines based on initial defects. In: *Energy Supply Technologies. Life Support Apparatus and Machines. Conference Proceedings [Tekhnologii energoobespecheniya Apparaty i mashiny zhizneobespecheniya. Sbornik statei konferentsii].* Anapa; 2020: 104–10. <https://elibrary.ru/ddqfgl> (in Russian)
 30. Bazarkayev S.E. Overview of external detection methods oil leaks in pipelines. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal «Vestnik nauki».* 2021; 2(6–1): 269–74. <https://elibrary.ru/qxkhwj> (in Russian)
 31. Kochetova Zh.Yu., Shishkin A.V., Vnukova S.V., Tronin A.L. Software for modeling the spread of an ammonia cloud during pipeline depressurization. In: *Physical Foundations of High Technologies: Materials of the All-Russian Scientific and Methodological Conference [Fizicheskie osnovy naukoemkikh tekhnologii. Materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii].* Voronezh; 2024: 56–62. https://doi.org/10.58168/PBST_56-62
 32. Afonin D.N. Features of the organization and customs control of goods belonging to the category of dangerous goods transported by international traffic. *Bulleten' innovatsionnykh tekhnologii.* 2019; 3(4): 5–13. <https://elibrary.ru/dvezdi> (in Russian)
 33. Liu Z., Zhou J., Reniers G. Association analysis of accident factors in petrochemical storage tank farms. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2023; 84: 105124. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105124>
 34. Kidam K., Hurme M. Analysis of equipment failures as contributors to chemical process accidents. *Process Saf. Environ. Prot.* 2013; 91(1–2): 61–78. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.02.001>
 35. Trávníček P., Kotek L., Junga P., Koutný T., Novotná J., Vítěz T. Prevention of accidents to storage tanks for liquid products used in agriculture. *Process Saf. Environ. Prot.* 2019; 128: 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.035>
 36. Zaïtsev A., Tul'skaya S., Sklyarov K. Causes and consequences of the accident at the fuel and lubricants warehouse of TPP-3 in Norilsk. *Gradostroitel'stvu Infrastruktura Kommunikatsii.* 2021; (3): 38–42. <https://elibrary.ru/jidfvr> (in Russian)
 37. Troshko K.A., Denisov P.V., Lavrova O.Yu., Loupian E.A., Medvedev A.A. Observation of the Ambarnaya river pollution resulting from the accident at the Norilsk thermal power plant no. 3 on May 29, 2020. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2020; 17(3): 267–74. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-267-274>
 38. Mishchenko E.V., Savitskaya T.V., Egorov A.F. Classification of chemicals and analysis of consequences of accidents during its storage using software, FLACS. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii.* 2015; 29(8): 66–9. <https://elibrary.ru/uyaiba> (in Russian)
 39. Belykh D.S., Fomin A.I. Analysis of conditions for occurrence and development of accidents at a chemically hazardous facility (KAO "Azot"). In: *Safety of Enterprises' Life Activity in Industrially Developed Regions. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference [Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti predpriyatiy v promyshlennoy razyvayushchih regionakh. Sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii].* Kemerovo; 2021. <https://elibrary.ru/snquhz> (in Russian)
 40. Chemical Production. Great Russian Encyclopedia 2004–2017. Available at: <https://old.bigenc.ru/chemistry/text/4665977> (in Russian)
 41. Li X., Chen C., Hong Y.D., Yang F.Q. Exploring hazardous chemical explosion accidents with association rules and Bayesian networks. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2023; 233: 109099. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109099>
 42. Avdotin V., Avdotina J., Benin A., Gromenko M., Kossoi A. The modern approach to the analysis of thermal dangers. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti.* 2012; 9(2): 14–21. <https://elibrary.ru/oysdqj> (in Russian)
 43. Mamleeva N.A. Industrial waste in Russia and its neutralization. In: *Collection of Scientific Articles Following the International Scientific Forum "Science and Innovations – Modern Concepts" [Sbornik nauchnykh statei po itogam rabot Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma "Nauka i innovatsii – sovremennye kontsepsi".]* Moscow: Infiniti; 2022: 79–89. <https://elibrary.ru/fhajky> (in Russian)
 44. Mamleeva N.A. Thermal technologies for waste neutralization and disposal. In: *Collection of Scientific Articles Following the International Scientific Forum "Science and Innovations – Modern Concepts" [Sbornik nauchnykh statei po itogam rabot Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma "Nauka i innovatsii – sovremennye kontsepsi".]* Moscow: Infiniti; 2022: 69–78. <https://elibrary.ru/zflpxi> (in Russian)
 45. Khasilov I., Matamatova F. Research on modern methods of utilization and recycling of chemical waste products. *Universum: tekhnicheskie nauki.* 2024; (6–3): 49–51. <https://elibrary.ru/lphdze> (in Russian)
 46. Abdel-Shafy H.I., Ibrahim A.M., Al-Sulaiman A.M., Okasha R.A. Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview. *Ain Shams Eng. J.* 2024; 15(1): 102293. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102293>
 47. Gunaratne V., Phillips A.J., Zanoletti A., Rajapaksha A.U., Vithanage M., Di María F., et al. Environmental pitfalls and associated human health risks and ecological impacts from landfill leachate contaminants: Current evidence, recommended interventions and future directions. *Sci. Total. Environ.* 2024; 912: 169026. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169026>
 48. Weichenthal S., Van Rijswijk D., Kulka R., You H., Van Ryswyk K., Willey J., et al. The impact of a landfill fire on ambient air quality in the north: A case study in Iqaluit, Canada. *Environ. Res.* 2015; 142: 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.06.018>
 49. Ruokojärvi P., Ettala M., Rahkonen P., Tarhanen J., Ruuskanen J. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and -furans (PCDDs AND PCDFs) in municipal waste landfill fires. *Chemosphere.* 1995; 30(9): 1697–708. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(95\)00055-D](https://doi.org/10.1016/0045-6535(95)00055-D)

Review article

50. Filatkin P.V., Vinogradova E.N., Tkacheva D.A., Balyanov G.A., Muratova N.M. Technical regulation of chemicals: development of hazard information system. *Khimicheskaya bezopasnost'*. 2018; 2(2): 323–35. <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.2.14125> <https://elibrary.ru/yszscl> (in Russian)
51. Artemenko L., Kibarolu D. Features of the organization of transportation of dangerous goods. Directions for optimizing the formation of supply chains for liquid dangerous goods. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya D. Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki*. 2020; (13): 2–9. <https://elibrary.ru/uveynl> (in Russian)
52. Wu J., Lu Y., Shi S., Zhou R., Liu Y. Research on the prediction model of hazardous chemical road transportation accidents. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2023; 84: 105103. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105103>
53. Darbra R.M., Palacios A., Casal J. Domino effect in chemical accidents: main features and accident sequences. *J. Hazard. Mater.* 2010; 183(1–3): 565–73. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.061>
54. Kustova E.V. Ensuring industrial safety in chemical production. *Nauchnye izvestiya*. 2022; (27): 159–62. <https://elibrary.ru/hnzflk> (in Russian)
55. Zejnetdinova O.G., Danilov P.V., Kokurin A.K., Tyapochkin S.P. On the issue of ranking potentially dangerous objects by the degree of danger to the population and territories by risk indicators on the territory of the central federal district. *Pozharnaya i avariinaya bezopasnost'*. 2021; (1): 22–6. <https://elibrary.ru/dahty> (in Russian)

Сведения об авторах

Лебедь-Шарлевич Яна Ивановна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. отд. профилактической токсикологии и медико-биологических исследований, ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: YaSharlevich@cspfmba.ru

Мамонов Роман Александрович, канд. мед. наук, начальник отд. профилактической токсикологии и медико-биологических исследований, ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: RMamonov@cspfmba.ru

Савостикова Ольга Николаевна, канд. мед. наук, начальник отд. физико-химических исследований и экотоксикологии, ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: OSavostikova@cspfmba.ru

Information about the authors

Yana I. Lebed-Sharlevich, PhD (Biology), senior researcher, Department of preventive toxicology and biomedical research, Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4249-1093> E-mail: YaSharlevich@cspfmba.ru

Roman A. Mamontov, PhD (Medicine), head, Department of preventive toxicology and biomedical research, Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6540-6015> E-mail: RMamonov@cspfmba.ru

Olga N. Savostikova, PhD (Medicine), head, Department of physicochemical research and ecotoxicology, Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7032-1366> E-mail: OSavostikova@cspfmba.ru