

Научная статья

УДК 614.8; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-17-29

ОЦЕНКА РИСКА ТЕХНОГЕННЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

✉ Кудрявцев Сергей Сергеевич.

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда,
Казахстан

✉ sk74_07@mail.ru

Аннотация. Целью исследования является апробация оригинальной методики оценки риска аварий и производственного травматизма на химически опасных объектах, производящих серную кислоту. Серная кислота имеет широкий спектр применения во многих отраслях промышленности, однако процесс ее производства связан с определенным риском. В представленной методике состояние системы управления охраной труда и промышленной безопасности оценивается, используя независимые показатели – уровни риска аварий и производственного травматизма. В основе методики оценки риска аварий лежит метод экспертных оценок, методика оценки риска производственного травматизма основывается на статистическом методе. Риск аварий определяется по соотношению двух показателей: опасности химически опасного объекта и уязвимости персонала от поражающих факторов в случае аварии на нем. Показатель опасности химически опасного объекта определяется критериальными параметрами, объединенными в четыре кластера: организационный, технический, человеческий и технологический. Риск производственного травматизма определяется по соотношению показателей частоты производственного травматизма и тяжести вреда здоровью. Проведенное исследование показало, что эффективные мероприятия в области охраны труда и промышленной безопасности позволяют стабилизировать риск аварий на низком уровне даже на производственных объектах с технологическим оборудованием, представляющим высокую потенциальную опасность. Исследование не выявило различий между используемой технологией производства серной кислоты и уровнем риска аварий и производственного травматизма у работников исследованных химически опасных объектов.

Ключевые слова: техногенная чрезвычайная ситуация, риск, оценка риска, химически опасный объект, аварийно химически опасное вещество, аварийность, производственный травматизм

Для цитирования: Кудрявцев С.С. Оценка риска техногенных чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах по производству серной кислоты // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3 (75). С. 17–29. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-17-29.

Scientific article

RISK ASSESSMENT OF MAN-MADE EMERGENCIES AT CHEMICALLY HAZARDOUS SITES FOR SULFURIC ACID PRODUCTION

✉ Kudryavtsev Sergey S.

Karaganda technical university of Abylkasa Saginov, Karaganda, Republic of Kazakhstan

✉ sk74_07@mail.ru

Abstract. This study aims to test an original methodology for assessing the risk of accidents and occupational injuries at chemically hazardous sites producing sulphuric acid. While sulphuric acid has broad industrial applications, its production process entails significant risks. The proposed methodology evaluates the state of the occupational health and safety management system using two independent indices: accident risk and occupational injury risk. Accident risk is assessed through expert evaluation, whereas occupational injury risk is determined using statistical methods. The accident risk level is calculated as the ratio of two factors: the hazard of the chemically hazardous site and the vulnerability of personnel to destructive factors in the event of an accident. Site hazard is defined by criteria grouped into four clusters: organisational, technical, human, and technological. Occupational injury risk is measured as the ratio of injury frequency to the severity of health consequences. The findings demonstrate that effective occupational health and safety measures can maintain accident risk at a low level, even at facilities operating high-hazard technological equipment. The study found no significant differences between the sulphuric acid production technology employed and the levels of accident risk and occupational injury among workers at the site.

Keywords: man-made emergency, risk, risk assessment, chemically hazardous site, hazardous chemical, accident, occupational injury

For citation: Kudryavtsev S.S. Risk assessment of man-made emergencies at chemically hazardous sites for sulfuric acid production // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 3 (75). P. 17–29. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-17-29.

Введение

Серная кислота является очень важной химической продукцией, а масштабы ее производства являются достоверным индикатором уровня индустриального развития страны [1]. Мировое производство серной кислоты в 2022 г. составило около 265 млн т и показывает тенденцию к дальнейшему росту [2]. Большая часть полученной продукции (≈60 %) используется для производства удобрений, в частности суперфосфатов, фосфата аммония и сульфата аммония. Около 20 % используется в химической промышленности для производства моющих средств, синтетических смол, красителей, фармацевтических препаратов, инсектицидов, антифризов, а также в различных технологических процессах, таких как кислотная обработка нефтяных скважин, восстановление алюминия, водоподготовка. Около 6 % используется при производстве лакокрасочной продукции, в то время как остальная часть имеет обширную сферу применения: производство взрывчатых веществ, целлофана, ацетатных и вязкозных тканей, смазочных материалов, цветных металлов и аккумуляторов [3].

Существуют несколько способов промышленного производства серной кислоты. При этом выбор технологии производства может быть определен сырьевой базой, требованиями к химической чистоте продукции, действующими экологическими нормами и другими факторами. Так, разработанные на глобальном уровне и ратифицированные на национальных уровнях правовые акты требуют от владельцев металлургических производств организовать

утилизацию диоксида серы, образующегося в процессе плавки руды, на установках по производству серной кислоты [4]. Вместе с этим необходимо учитывать, что серная кислота является аварийно химическим веществом (АХОВ), представляющим потенциальную угрозу для работников как при ее производстве, так и при применении.

16 февраля 2017 г. на химически опасном объекте (ХОО), принадлежащем компании Hamm Chemie, в г. Оберхаузен (Германия) произошел выброс токсичного облака, образовавшегося при взаимодействии соляной и серной кислот¹. Причиной аварии стал человеческий фактор: в результате неправильного соединения труб была произведена разгрузка соляной кислоты из танкера в резервуар, в котором находилось около 600 м³ 96-процентной серной кислоты.

В результате поражения продуктами реакции этих соединений за медицинской помощью обратились около 150 чел.: 40 из них – персонал предприятия, остальные – работники расположенного неподалеку промышленного объекта. Авария парализовала движение автотранспорта в городе, железнодорожное сообщение и судоходство по каналу Рейн-Херне. Предприятию был нанесен материальный ущерб примерно в 1,5 млн евро².

Анализ баз данных о произошедших авариях, связанных с серной кислотой или продуктами, используемыми для ее синтеза, показал преобладание транспортных аварий³. Вместе с этим аварии на промышленных объектах нередки и, по сравнению с транспортными авариями, сопровождаются большими человеческими и финансовыми потерями. По статистике [5], на производстве треть несчастных случаев с серной кислотой связана с химическими ожогами, еще около трети – с раздражением дыхательных путей.

Это делает актуальным применение существующих методологических подходов к оценке риска химических аварий и производственного травматизма работников ХОО, производящих серную кислоту, что и определило цель проведенного исследования.

В то же время в Республике Казахстан до настоящего времени отсутствует база данных о химических авариях и инцидентах, что существенно затрудняет использование апостериорного подхода к оценке риска аварий на ХОО предприятий [6, 7].

К настоящему времени накоплен большой опыт оценки рисков, связанных с функционированием ХОО. В то же время, используя методологии на практике, пользователю приходится сталкиваться с некоторыми ограничениями. Так, метод качественной оценки рисков HAZOP являясь одним из первых, разработанных для предприятий химической отрасли, исследует отклонения всех переменных процесса на предприятии, определяет их причины и последствия. Однако этот метод не способен идентифицировать опасности, вызванные взаимодействием различных отклонений процесса, устранять опасности, связанные с технологическим процессом, оценивать влияние организационных факторов высокого уровня на действия работников [8–10].

Также широкое применение нашел еще один метод качественной оценки рисков – анализ видов и последствий отказов (FMEA). Он позволяет оценить множественные отказы и так же, как и HAZOP, составляет основу идентификации опасностей. При этом отмечено, что данные методы не показали эффективности при обнаружении всех значительных опасностей. Стоит отметить, что эти методы в большей части ориентированы на аппаратные отказы, не принимая в расчет взаимодействие «человек – производственная среда», а также

¹ Industrial Plant Safety. Hamm Chemie chemical tank accident – several hospitalized as HCl pumped into oleum tank. 2017. URL: <https://industrialplantsafety.com/hamm-chemie-chemical-tank-accident-hydrochloric-acid-hcl-h2so4-oleum-sulfuric-acid.html> (дата обращения: 15.04.2025)

² Russia Today. Acid fumes over German town after leak at chemical plant. 2017. URL: <https://www.rt.com/news/377533-acid-leak-germany-sulphuric/> (дата обращения: 08.04.2025)

³ DKL Engineering Inc. Sulphuric Acid Plant Safety – Accidents (Recent). 2024. URL: http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/Plant_Safety/safety_accidents.htm (дата обращения: 08.04.2025).

взаимодействие между организационными и человеческими факторами. В свою очередь, отсутствие всестороннего анализа факторов риска затрудняет идентификацию и локализацию всех опасностей сложной системы [11].

Для количественного ранжирования факторов по степени их влияния на безопасность [12] эффективно применяется экспертная система. Ее суть заключается в предъявлении экспертам всех факторов модели. Эксперты, опираясь на собственный опыт и знания, распределяют их по степени влияния на вероятность аварии и выделяют наиболее важные факторы. Такое распределение может позволить аргументированно развивать стратегию, направленную на снижение аварийности.

Объективная оценка уровня опасности промышленных предприятий требует обозначить критерии, способные стать основой для суждения о степени безопасности. Эти критерии должны учитывать все виды деятельности организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты. Для оценки уровня промышленной безопасности необходимо использовать показатели, унифицированные для различных отраслей промышленности.

Методы исследования

Состояние системы управления охраной труда и промышленной безопасностью на ХОО оценивалось по уровням риска аварий и производственного травматизма и соответствующим им классам аварийности и травмоопасности ХОО. Уровень риска аварий на ХОО оценивался с помощью метода экспертных оценок, в основе оценки уровня риска производственного травматизма лежит статистический метод. Подробная методология определения данных показателей приведена в ранее опубликованной работе [6].

В качестве объектов исследования были выбраны три ХОО, производящие серную кислоту и расположенные в гг. Балхаш, Жезказган и Тараз. В нижеприведенных таблицах данным ХОО соответствуют столбцы 1, 2 и 3. Первые два ХОО относятся к медеплавильным заводам, входящим в единую корпорацию. Третий ХОО относится к предприятию по производству фосфатных удобрений.

Результаты исследования и их обсуждение

На изученных ХОО используются разные технологии производства серной кислоты. Так, на ХОО 1 и 2 исходным продуктом для производства серной кислоты является сернистый ангидрид – побочный продукт, образующийся в процессе обжига медной руды. Данное вещество также является АХОВ, оно подается в сернокислотный цех из медеплавильного производства с помощью трубопровода.

На ХОО 3 получаемая в результате плавления жидкая сера сжигается в трех циклонных топках. Получение серной кислоты происходит за счет сатурации водой образовавшегося в процессе сжигания серы сернистого ангидрида.

Расчет риска аварий и определение класса аварийноопасности ХОО

На основе анкетирования персонала исследуемых ХОО были определены показатели системы управления охраной труда и промышленной безопасностью (организационный кластер критериальных параметров). Их балльные значения представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Кластер организационных критериальных параметров оценки системы управления
производственной безопасностью на исследуемых ХОО**

№	Наименование критериального параметра	ХОО, балльная оценка		
		1	2	3
1	Организация обучения управлению производственной безопасностью	1	1	1
2	Функционирование отдела (ответственного лица) по промышленной безопасности и охраны труда на предприятии	1	1	2
3	Наличие полного пакета технической документации, актов, журналов, паспортов	1	1	1
4	Проведение периодического пересмотра инструкций и схем	3	3	3
5	Выполнение письменных рабочих процедур и задач с четкими инструкциями	1	1	1
6	Проведение анализа (рисков) опасностей процесса для выявления, оценки и контроля опасностей процессов	4	4	4
7	Применение и проверка состояния систем контрольно-измерительных приборов (КИП) и средств автоматизации	1	1	1
8	Проведение периодических проверок рабочих мест, оборудования и конструкции проектным спецификациям и соответствию требованиям пожарной безопасности (ПБ)	1	1	1
9	Мониторинг содержания территории предприятия (участка) в надлежащем порядке (безаварийном состоянии)	1	1	1
10	Наличие обратной связи персонала с руководством по вопросам анализа рисков процесса и других элементов управления процессами. Наличие программ стимулирования безопасности	1	1	1
11	Наличие подробного плана действий в чрезвычайных ситуациях. Проведение обучения и учебно-тренировочных занятий	1	1	1
12	Проведение периодического аудита управления производственной безопасностью	1	1	1
13	Содержание в надлежащем порядке вспомогательных систем: вентиляции, отопления, канализации на предприятии в целом, участках, рабочих местах	2	3	3

Персонал всех трех ХОО своевременно прошел обучение по курсу «Промышленная безопасность на опасных производственных объектах» (табл. 1). В цехах в полном объеме имеется документация, регламентирующая и подтверждающая периодичность проверки и ремонта оборудования и КИП и автоматики (А). Все письменные рабочие процедуры и задачи в цехах выполняются в полном объеме. Производство всех ХОО полностью оснащено необходимыми системами КИП и средств автоматизации. Регулярно, в соответствии с планом, на всех ХОО проводятся проверки соответствия рабочих мест, технологического оборудования и защитных устройств требованиям промышленной безопасности. При этом отмечено, что на ХОО 2 и 3 существующая система вентиляции не способна эффективно осуществлять воздухообмен в рабочей зоне. В цехе на постоянной основе осуществляется обратная связь персонала по вопросам соблюдения безопасности производственных процессов, которая поощряется администрацией. На предприятии, где расположен ХОО 3, пожелания персонала заносятся в журнал контроля, запущен проект «Фабрика идей», направленный, в том числе, и на повышение уровня безопасности производственных процессов.

На всех трех предприятиях существуют службы безопасности и охраны труда, за ее сотрудниками закреплены определенные цеха, ежегодно производится их ротация. На ХОО 1 и 2 стаж работников службы, ответственных за эти ХОО, более 5 лет. На предприятии, где функционирует ХОО 3, штат службы составляет 8 чел., планируется его расширение до 12 чел. Стаж работника службы, ответственного за ХОО 3, 3–5 лет. На всех

ХОО своевременно производится пересмотр инструкций и схем, направленных на безопасность технологических процессов (каждые три года). Для анализа опасностей процесса на ХОО 1 и 2 работники в начале каждой смены используют чек-лист, а на ХОО 3 – реестр опасностей и рисков. Вместе с этим во всех трех случаях была показана их невысокая эффективность. На всех ХОО постоянно и эффективно (100 %) проводится мониторинг содержания территории в надлежащем порядке. Во всех цехах имеются подробные планы действий персонала в случае чрезвычайной ситуации (ЧС), с персоналом регулярно проводятся учебно-тренировочные занятия по действиям при возникновении аварийной ситуации. Места для подъезда, стоянки и выезда спецтехники, используемой для ликвидации аварий, в соответствии с планом ликвидации аварий, находятся в хорошем состоянии. На всех ХОО ежегодно проводится аудит управления промышленной безопасностью. Системы вентиляции, отопления, канализации на предприятиях в целом и отдельных его подразделениях содержатся в хорошем (ХОО 1) и удовлетворительном (ХОО 2 и 3) состоянии.

Большинство оценок системы управления производственной безопасностью в кластере организационных критериальных параметров имеют минимальное значение, равное 1 (табл. 1). Имеют повышенный уровень 4-й, 6-й и 13-й параметры – 3, 4 и 3 балла соответственно. Руководству предприятий рекомендуется усилить контроль за проведением периодического пересмотра инструкций и схем. Службам по охране труда и пожарной безопасности (ОТ и ПБ) необходимо уделять больше внимания на процесс проведения анализа рисков процесса для выявления, оценки и контроля опасностей процессов. ХОО 2 и 3 требуется модернизация системы вентиляции.

Проведение анкетирования персонала ХОО позволило определить балльные значения показателей, характеризующих применяемое в цехах оборудование (табл. 2).

Таблица 2

Кластер технических критериальных параметров оценки системы управления производственной безопасностью на исследуемых ХОО

№	Наименование критериального параметра	ХОО, балльная оценка		
		1	2	3
1	Сосуды под давлением, группа	5	5	4
2	Сепарационное оборудование, м ³	4	5	4
3	Химические реакторы. Рабочий объем, м ³	5	5	5
4	Теплообменное оборудование. Площадь поверхности нагрева, м ²	4	5	5
5	Длина систем трубопроводов, транспортирующих АХОВ, м	3	5	5
6	Коэффициент износа основных фондов, доли	1	5	5
7	Коэффициент замены основных средств, доли	1	4	5
8	Производительность насосов (компрессоров), м ³ /ч	5	3	5
9	Количество резервуаров для хранения АХОВ на объекте, шт.	4	5	3
10	Органы управления (устройства контроля, сигнализации, датчики, блокировки, наличие предохранительных систем, в том числе автоматических запорных клапанов)	1	5	1
11	Наличие средств локализации	1	5	1

На ХОО 1 используется автоклав, создающий давление до 7 атм (группа 1). Там же используется сепарационное оборудование объемом 132 м³. Рабочий объем химического реактора составляет 900 м³. В цехе используется теплообменное оборудование объемом 1 746 м³. В сумме площадь поверхности их нагрева составляет 600 м². Длина систем трубопроводов, транспортирующих серную кислоту, составляет 140 м. Все технологическое оборудование в цехе своевременно проходит проверку и, в случае необходимости, заменяется, что не позволяет говорить о каком-либо существенном его износе. Производительность

компрессоров, насосов, функционирующих в цехе, составляет в сумме 2 870 м³/ч. Снаружи цеха имеется четыре резервуара с готовой серной кислотой. Технологическое оборудование оснащено всеми необходимыми органами управления, средствами локализации, системами и устройствами аварийного сброса и вентиляции.

На ХОО 2 используется автоклав, создающий давление до 7 атм (группа 1). Также там используется сепарационное оборудование (6 единиц объемом по 55 м³ каждая). Рабочий объем каждого из 21 химического реактора составляет 60 м³. В цехе используется теплообменное оборудование. В сумме площадь поверхности его нагрева составляет более 800 м². Длина систем трубопроводов, транспортирующих серную кислоту, составляет более 800 м. Коэффициенты износа основных фондов и замены основных средств составляют 30 %. Производительность насоса отстойника составляет 115 м³/ч, насоса сборника – 32 м³/ч. Снаружи цеха имеется 7 резервуаров с готовой серной кислотой. Отмечена недостаточная оснащенность технологического оборудования необходимыми органами управления, средствами локализации, системами и устройствами аварийного сброса и вентиляции.

На ХОО 3 используются сосуда, работающие под давлением, относящиеся ко второй группе. На ХОО 3 используется сепарационное оборудование объемом около 100 м³. В цехе используются 2 химических реактора – котел топки и пусковой котел объемом по 50 м³ каждый. В цехе используются кожухо-трубные теплообменники. В сумме площадь поверхностей их нагрева составляет более 1 000 м². Длина систем трубопроводов, транспортирующих серную кислоту, составляет 200 м, сернистый ангидрид – 150 м. Коэффициент износа основных фондов составляет 50 %. Коэффициент замены основных средств составляет 20 %. Производительность трех компрессоров подачи воздуха составляет 120 000 м³/ч. Снаружи цеха имеется три резервуара с готовой серной кислотой объемом по 1 200 м³ каждый. Технологическое оборудование оснащено всеми необходимыми органами управления, средствами локализации, системами и устройствами аварийного сброса и вентиляции.

Как видно из данных табл. 2, балльные оценки технических критериальных параметров в кластере достаточно высоки. Поскольку многие критериальные параметры описывают те элементы технологического процесса, изменение которых не представляется возможным, это требует тщательного контроля за техническим состоянием описываемого ими производственного оборудования. На ХОО 2 и 3 необходимо обратить внимание на критериальные параметры 6 и 7, указывающие на значительный износ применяемого оборудования и необходимость проведения работ по обновлению основных средств и фондов. Кроме того, на ХОО 2 критические значения показателей, характеризующих как состояние технологического оборудования, так и органов управления, средств локализации, систем и устройств аварийного сброса и вентиляции, свидетельствует о необходимости коренной модернизации производства.

Анкетирование персонала исследуемых ХОО позволило определить показатели, характеризующие вклад персонала в развитие аварийной ситуации (табл. 3). Весь персонал ХОО и работающие в них подрядчики (кроме ХОО 3) своевременно прошли обучение и успешно сдали экзамен на знание правил техники безопасности и промышленной безопасности на опасных производственных объектах. На ХОО 3 соответствие знаний техники безопасности и производственного процесса среди подрядчиков составило 60 %. Бригады цехов укомплектованы работниками на 100 % на ХОО 2 и на 90 % – на ХОО 1 и 3. В зависимости от особенностей технологического процесса на предприятии, персонал цехов работает в две или три смены на ХОО 1 и 2 и в две смены на ХОО 3.

Таблица 3

**Кластер человеческих критериальных параметров
(работающий на промышленном предприятии персонал)
оценки системы управления производственной безопасностью на ХОО**

№	Наименование критериального параметра	ХОО, балльная оценка		
		1	2	3
1	Оценка уровня знаний персонала техники безопасности (ТБ) и производственных инструкций, об опасности АХОВ, находящихся в обороте, технологии процесса производства. Количество работников ХОО, прошедших обучение по курсу «Промышленная безопасность на опасных производственных объектах» / повышение квалификации (за отчетный период)	1	1	1
2	Соответствие знаний подрядчиков ТБ и производственного процесса (аналогично п. 1)	1	1	5
3	Наличие укомплектованности бригад, %	3	1	2
4	График трудового процесса	5	5	3

Как следует из табл. 3, наибольшее внимание, особенно на ХОО 1 и 2, необходимо обратить на состояние здоровья работающего персонала (напряжение, утомляемость, работа в ночное время). Критериальный параметр «График трудового процесса» в этой связи получил наивысший балл. На ХОО 3 рекомендуется уделять больше внимания уровню знаний работников подрядчиков производственного процесса и безопасных приемов работы.

В табл. 4 приведены технологические (проектные) критериальные параметры оценки системы управления производственной безопасностью на исследуемых ХОО, в том числе и свойств АХОВ, влияющих на безопасность технологических процессов. На ХОО 1 и 2 функционирует система управления процессом изменений: ежегодно рассматривается возможность изменений с целью повышения уровня безопасности труда. Здания, сооружения, склады для хранения АХОВ, функционирование технологических линий и нового оборудования, защитные и предохранительные устройства, КИП, системы вентиляции, отопления (ХОО 1 и 3), водопровода, канализации, освещения полностью соответствуют проектным решениям. Вместе с этим на ХОО 2 система отопления показывает недостаточную эффективность. Снаружи ХОО 1 установлены четыре резервуара с готовой серной кислотой емкостью 7 200 м³ каждый. Снаружи ХОО 2 установлены семь резервуаров с готовой серной кислотой, четыре из них емкостью 600 м³ и три – 2 100 м³ каждый. На территории ХОО 3 имеются резервуары, в которых хранится 6 000 т серной кислоты.

Таблица 4

**Кластер технологических (проектных) критериальных параметров оценки
системы управления производственной безопасностью на ХОО с учетом свойств,
применяемых в технологическом процессе АХОВ**

№	Наименование критериального параметра	ХОО, балльная оценка		
		1	2	3
1	Функционирование системы Управление процессом изменений, год	2	1	5
2	Соответствие проектным решениям для зданий и сооружений, складов, мест хранения АХОВ, %	1	1	1
3	Соответствие проектным решениям защитных и предохранительных устройств, КИП, %	1	1	1
4	Соответствие проекту систем вентиляции, отопления, канализации, водопровода, освещения на предприятии в целом, участках, рабочих местах, %	1	4	1
5	Соответствие проекту работы технологических линий и нового оборудования, %	1	1	1
6	Данные о коррозионной активности,	5	5	5
7	Объем хранения, т	5	5	5

№	Наименование критериального параметра	ХОО, балльная оценка		
		1	2	3
8	Классы опасности химической продукции, представляющей собой: – воспламеняющаяся жидкость; – воспламеняющееся твердое вещество; – воспламеняющийся газ	0	0	0
9	Классы опасности взрывчатой химической продукции	0	0	0
10	Температурный класс (Температура самовоспламенения смеси, °С)	1	1	1
11	Группа горючести	0	0	0

Как видно из табл. 4, критериальный параметр «Объем хранения» в первых двух цехах имеет максимальное значение – 5 баллов, как и высокая коррозионная активность серной кислоты. Это указывает на необходимость тщательного контроля за состоянием резервуаров с АХОВ.

В табл. 5 представлены балльные оценки критериальных параметров, характеризующих уязвимость персонала в случае ЧС на ХОО. На всех трех ХОО в случае аварии с АХОВ весь персонал будет иметь возможность своевременной эвакуации. На всех ХОО имеется план эвакуации персонала при ЧС, производственные помещения имеют не менее двух эвакуационных выходов. Защитные сооружения имеются на ХОО 1 и 2, на ХОО 3 они не предусмотрены проектом. Укомплектованность вспомогательными средствами безопасности на ХОО 1 и 3 составляет 100 %, на ХОО 2 – 50 %. Системы аспирации, вентиляции, пылеподавления, утилизации и локализации вредных веществ содержатся в хорошем состоянии. С учетом специфики технологического процесса, на ХОО 1 и 3 все оборудование оснащено необходимыми системами дистанционного управления и контроля, системой защиты от самозапуска, круглосуточного наблюдения. Для ХОО 2 этот показатель превышает 80 %. На всех ХОО технологическое оборудование оснащено предохранительными устройствами. На ХОО 3 все рабочие места оснащены местными системами вентиляции, водопровода, канализации, защитными устройствами, тогда как на ХОО 1 и 2 этот показатель превышает 80 %. Персонал всех трех ХОО полностью обеспечен необходимыми средствами индивидуальной защиты (СИЗ). СИЗ на рабочих местах находятся в отличном состоянии.

Таблица 5

**Кластер для оценки показателя уязвимости работающего персонала
при воздействии повреждающего фактора в результате
техногенных ЧС на ХОО**

№	Наименование критериального параметра	ХОО, балльная оценка		
		1	3	3
1	Наличие времени для эвакуации и других экстренных мероприятий при возникновении аварии	1	1	1
2	Наличие плана эвакуации персонала ХОО предприятия в случае отказа оборудования или возникновения нештатной ситуации и наличие в помещениях машинного, аппаратного отделения эвакуационных выходов	1	1	1
3	Наличие защитных сооружений	1	1	1
4	Наличие опознавательных знаков, ограждений, световой сигнализации, съемных закрывающихся щитов, средств предупредительной сигнализации, предупредительных плакатов	1	3	1
5	Наличие систем аспирации, вентиляции, пылеподавления, утилизации и локализации вредных веществ	1	1	1
6	Наличие дистанционных приборов и управления, систем контроля, обеспечение защитой от самозапуска, круглосуточного наблюдения	1	2	1
7	Наличие предохранительных устройств	1	1	1
8	Наличие местных вентиляционных систем, системы местных отсосов, индивидуальной канализации, водопровода и защитных устройств	2	2	1
9	Наличие на рабочих местах СИЗ	1	1	1
10	Укомплектованность персонала предприятия средствами СИЗ	1	1	1

Как следует из табл. 5, критериальные параметры кластера для оценки показателя уязвимости работающего на ХОО персонала большей частью имеют минимальные величины, показывающие, что на всех ХОО выполняются в достаточном объеме мероприятия, направленные на повышение уровня безопасности работников. На ХОО 2 администрации и службе охраны труда рекомендуется обратить внимание на состояние знаков безопасности.

Используя матрицы [6], были определены риски аварий и классы аварийности исследованных ХОО. В табл. 6 представлены конечные результаты проведенного моделирования по аварийности на исследуемых ХОО. Как следует из результатов оценки риска аварий, на ХОО 1 он определен как «незначительный» и установлен V класс аварийноопасности. Для ХОО 2 и 3 риск аварий оценен как «малый» и установлен IV класс аварийноопасности.

Таблица 6

Результаты моделирования по аварийности

Показатели	ХОО, балльная оценка		
	1	2	3
Показатель опасности	1,959	2,41	2,412
Показатель уязвимости	1,09	1,2	1
Риск аварий	Незначительный	Малый	Малый
Класс аварийноопасности	V	IV	IV

Расчет риска производственного травматизма и определение класса травмоопасности ХОО и предприятия в целом

Среднесписочное количество работников ХОО 1 за исследуемый период (последние 5 лет) составило 263 чел. (табл. 7). Случаев производственного травматизма на ХОО 1 зарегистрировано не было. Как следует из этой же таблицы, среднесписочное количество работников ХОО 2 и 3 за исследуемый период составило 202 и 110 чел. соответственно. За исследуемый период на каждом из них было зарегистрировано по одному несчастному случаю, не связанному с АХОВ (табл. 7).

Таблица 7

Кластер по оценке риска производственного травматизма работников ХОО предприятия

№	Показатели	ХОО, балльная оценка		
		1	2	3
1	Количество несчастных случаев на предприятии (в отдельных его подразделениях) за исследуемый период	0	1	1
2	Среднесписочное количество работников на производственном предприятии (в отдельных его подразделениях) за исследуемый период	263	202	110
3	Степень стойкой утраты трудоспособности работников в результате травм, полученных за исследуемый период	–	летальный	летальный

Используя матрицы [6], были определены риски производственного травматизма и классы травмоопасности исследованных ХОО. В табл. 8 представлены конечные результаты проведенного моделирования по производственному травматизму на ХОО. Как следует из результатов оценки риска травматизма, на ХОО 1 он отсутствует (класс травмоопасности – V), на ХОО 2 и 3 он оценен как «критический» (класс травмоопасности – I).

Таблица 8

Результаты моделирования по производственному травматизму

Показатели	ХОО, балльная оценка		
	1	2	3
Показатель частоты производственного травматизма	0	0,005	0,0039
Показатель тяжести вреда здоровью	0	Летальный исход	Летальный исход
Риск производственного травматизма	Отсутствует	Критический	Критический
Класс травмоопасности	V	I	I

Заключение

Представленная в статье методика позволяет оценить риски для персонала, связанные с функционированием ХОО с точки зрения ключевых аспектов промышленной и химической безопасности. Эффективное функционирование системы охраны труда позволяет поддерживать на исследуемых ХОО уровень риска инцидентов и аварий на низких значениях. Вместе с этим критический уровень риска производственного травматизма на двух ХОО свидетельствует о необходимости повышения культуры безопасности как среди работников, так и среди менеджеров, ответственных за безопасное функционирование предприятий. Разработанная методика не выявила достоверных различий между используемой технологией производства серной кислоты и уровнем риска аварий и производственного травматизма у работников исследованных ХОО.

Список источников

1. Chenier Ph.J. Survey of Industrial Chemistry. New York: John Wiley & Sons, 1986. P. 433.
2. Statista Research Department. Market volume of sulfuric acid worldwide from 2015 to 2022, with a forecast for 2023 to 2030 // Chemicals & Resources. Chemical Industry. 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/1245226/sulfuric-acid-market-volume-worldwide/> (дата обращения: 08.12.2024).
3. Greenwood N.N., Earnshaw A. Chemistry of the Elements. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. P. 653.
4. Roy P., Sardar A. SO₂ emission control and finding a way out to produce sulphuric acid from industrial SO₂ emission // Journal of Chemical Engineering & Process Technology. 2015. Vol. 6. № 2. P. 1000230. DOI: 10.4172/2157-7048.1000230.
5. Anderson A.R. Top five chemicals resulting in injuries from acute chemical incidents – hazardous substances emergency events surveillance, nine states, 1999–2008 // Surveillance Summaries. 2015. Vol. 64 (SS 02). P. 39–46.
6. Yemelin P.V., Kudryavtsev S.S., Yemelina N.K. Improving the industrial safety management system at enterprises with chemically hazardous sites // Journal of Safety Science and Resilience. 2024. Vol. 5. № 4. P. 432–448. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2024.06.005.
7. Yemelin P.V., Kudryavtsev S.S., Yemelina N.K. The methodological approach to environmental risk assessment from man-made emergencies at chemically hazardous sites // Environmental Engineering Research. 2021. Vol. 26. № 4. P. 100–111. DOI: 10.4491/eer.2020.386.
8. STAMP – holistic system safety approach or just another risk model? / H. Altabbakh [et al.] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014. Vol. 32. P. 109–119.
9. Kariuki S.G., Löwe K. Integrating human factors into process hazard analysis // Reliability Engineering and System Safety. 2007. Vol. 92. № 12. P. 1764–1773.
10. Rodriguez M., Diaz I. A systematic and integral hazards analysis technique applied to the process industry // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 43. P. 721–729.

11. Development of a FRAM-based framework to identify hazards in a complex system / M. Yu [et al.] // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 63. № 1. P. 103994. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103994.

12. Гимельштейн Л.Я., Лудзиш В.С. Аварийность и травматизм на предприятиях угольной промышленности // *Безопасность труда в промышленности*. 1996. № 11. С. 13–14.

References

1. Chenier Ph.J. *Survey of Industrial Chemistry*. New York: John Wiley & Sons, 1986. P. 433.
2. Statista Research Department. Market volume of sulfuric acid worldwide from 2015 to 2022, with a forecast for 2023 to 2030 // *Chemicals & Resources. Chemical Industry*. 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/1245226/sulfuric-acid-market-volume-worldwide/> (data obrashcheniya: 08.12.2024).
3. Greenwood N.N., Earnshaw A. *Chemistry of the Elements*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. P. 653.
4. Roy P., Sardar A. SO₂ emission control and finding a way out to produce sulphuric acid from industrial SO₂ emission // *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. 2015. Vol. 6. № 2. P. 1000230. DOI: 10.4172/2157-7048.1000230.
5. Anderson A.R. Top five chemicals resulting in injuries from acute chemical incidents – hazardous substances emergency events surveillance, nine states, 1999–2008 // *Surveillance Summaries*. 2015. Vol. 64 (SS 02). P. 39–46.
6. Yemelin P.V., Kudryavtsev S.S., Yemelina N.K. Improving the industrial safety management system at enterprises with chemically hazardous sites // *Journal of Safety Science and Resilience*. 2024. Vol. 5. № 4. P. 432–448. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2024.06.005.
7. Yemelin P.V., Kudryavtsev S.S., Yemelina N.K. The methodological approach to environmental risk assessment from man-made emergencies at chemically hazardous sites // *Environmental Engineering Research*. 2021. Vol. 26. № 4. P. 100–111. DOI: 10.4491/eer.2020.386.
8. STAMP – holistic system safety approach or just another risk model? / H. Altabbakh [et al.] // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014. Vol. 32. P. 109–119.
9. Kariuki S.G., Löwe K. Integrating human factors into process hazard analysis // *Reliability Engineering and System Safety*. 2007. Vol. 92. № 12. P. 1764–1773.
10. Rodriguez M., Diaz I. A systematic and integral hazards analysis technique applied to the process industry // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. Vol. 43. P. 721–729.
11. Development of a FRAM-based framework to identify hazards in a complex system / M. Yu [et al.] // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 63. № 1. P. 103994. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103994.
12. Gimel'shtejn L.Ya., Ludzish V.S. Avarijnost' i travmatizm na predpriyatiyah ugol'noj promyshlennosti // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 1996. № 11. С. 13–14.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 08.04.2025; одобрена после рецензирования: 18.08.2025;
принята к публикации: 22.08.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 08.04.2025; approved after review: 18.08.2025;
accepted for publication: 22.08.2025

Сведения об авторах:

Кудрявцев Сергей Сергеевич, и.о. профессора кафедры «Рудничная аэрология и охрана труда» Карагандинского технического университета им. Абылкаса Сагинова (100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, д. 56), кандидат биологических наук, доцент, e-mail: sk74_07@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7232-6304>, SPIN-код: 2848-7331

Information about the authors:

Kudryavtsev Sergey S., acting professor of the department of mine aerology and occupational safety at Karaganda technical university of Abylkasa Saginov (100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, Nursultan Nazarbayev ave., 56), candidate of biological sciences, associate professor, e-mail: sk74_07@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7232-6304>, SPIN: 2848-7331