

Научная статья

УДК 614.849; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-127-139

СВЕДЕНИЯ ПО ЧАСТОТАМ РЕАЛИЗАЦИИ АВАРИЙНЫХ СОБЫТИЙ НА ОБЪЕКТАХ ПРОИЗВОДСТВА И ОБРАЩЕНИЯ ВОДОРОДА

✉Тимошенко Артем Леонидович;

Самигуллин Гафур Халафович;

Ребезов Сергей Александрович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉artem18181@gmail.com

Аннотация. Исследование посвящено решению проблемы оценки рисков на объектах производства и обращения смесей горючих газов с высоким содержанием водорода. В работе определены частоты реализации аварийных событий на основе статистических данных по авариям и инцидентам на взрывопожароопасных объектах в зависимости от отраслевой принадлежности, типа рассматриваемого оборудования и поражающего эффекта. Сбор и анализ статистических данных производился посредством обработки сведений из официальной базы данных водородных инцидентов и аварий Hydrogen incidents and accidents database (HIAD 2.1), созданной по инициативе Европейской комиссии по безопасности водорода. Сведения о частоте реализации аварийных событий, представленные в табличной форме, могут быть использованы при оценке пожарных рисков на взрывопожароопасных объектах производства и обращения водорода и водородсодержащих горючих смесях.

Ключевые слова: статистические данные, объекты производства и обращения водорода, частота события, авария, оценка риска, оборудование, промышленность, поражающий эффект

Для цитирования: Тимошенко А.Л., Самигуллин Г.Ф., Ребезов С.А. Сведения по частотам реализации аварийных событий на объектах производства и обращения водорода // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 2 (70). С. 127–139. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-127-139.

Scientific article

DATA ON FREQUENCIES OF ACCIDENT EVENTS AT HYDROGEN GAS PRODUCTION AND HANDLING FACILITIES

✉Timoshenko Artem L.;

Samigullin Gafur Kh.;

Rebezov Sergey A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉artem18181@gmail.com

Abstract. The research is devoted to solving the problem of risk assessment at hydrogen-containing gas production and handling facilities by obtaining calculated data on the frequencies of realisation of accidental events on the basis of statistical data on accidents at the facilities under consideration depending on the type of equipment of the facilities, the industry area and the striking effect. In this work, the collection, processing, verification, analysis of statistical data on the objects of production and circulation of hydrogen-containing gas, obtained from the official Hydrogen incidents and accidents database (HIAD 2.1), created by the European commission for hydrogen safety. On the basis of data analysis the frequencies of accident events realisation were obtained depending on the type of facility equipment, industry area and the impact effect on hydrogen-containing gas production and handling facilities.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024

Keywords: statistics, hydrogen gas production and handling facilities, frequencies, accident rate, risk assessment, equipment, industry, knock-on effect

For citation: Timoshenko A.L., Samigullin G.Kh., Rebezov S.A. Data on frequencies of accident events at hydrogen gas production and handling facilities // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 2 (70). P. 127–139. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-127-139.

Введение

Ведение статистического учета и анализ статистических данных по авариям на опасных производственных объектах (ОПО) необходимы для понимания реальной обстановки по аварийности на ОПО, сравнения динамики (увеличения, снижения) аварийности и дальнейшей разработки эффективных мероприятий по повышению безопасности с целью снижения смертности, травматизма и материального ущерба на ОПО.

Также статистические данные по аварийности, надежности технических устройств и технологических систем, соответствующие отраслевой специфике ОПО или виду производственной деятельности (характерные частоты аварийной разгерметизации типового оборудования ОПО (за исключением оборудования с обращением твердых веществ и их смесей), необходимы для оценки частоты инициирующих и последующих событий. Так, в типовых анализируемых сценариях аварий рекомендуется использовать частоты, представленные в приложении к Руководству по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах (приказ Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387) [1].

Статистические данные по аварийности или расчетные данные по надежности технологического оборудования, соответствующие специфике рассматриваемого объекта, могут использоваться для определения частоты реализации пожароопасных ситуаций. Рекомендуемые сведения по частотам реализации инициирующих пожароопасные ситуации типовых событий для некоторых типов оборудования объектов, частотам утечек из технологических трубопроводов, а также частотам возникновения пожаров в зданиях можно в приложении к Методике (Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: приказ МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404) [2].

Статистические данные по авариям на ОПО указаны в ежегодных отчетах о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору» на официальном сайте Ростехнадзора [3].

Статистические данные о чрезвычайных ситуациях представлены в ежегодных государственных докладах «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» на официальном сайте МЧС России [4].

Информация о пожарах и их последствиях, произошедших на территории Российской Федерации, публикуется в ежегодных информационно-аналитических сборниках «Пожары и пожарная безопасность» на официальном сайте Всероссийского ордена «Знак Почёта» научно-исследовательского института противопожарной обороны [5].

Однако в них не содержатся отдельные статистические разделы, связанные с аварийностью водородных систем, соответственно, рассчитать частоты инициирующих и последующих событий в анализируемых сценариях аварий на объектах производства и обращения водорода не представляется возможным, поэтому при оценке рисков на таких объектах специалисты используют общие рекомендуемые частоты аварий, что, по мнению авторов, снижает точность и достоверность расчетных данных.

Определение частоты реализации пожароопасных ситуаций является одним из наиболее важных этапов проведения расчетов по оценке пожарного риска, который в значительной мере определяет достоверность полученных результатов расчета значений риска [6].

Как известно, низкая вязкость и высокий коэффициент диффузии паровоздушной водородной смеси способствует проявлению эффектов стратификации (пространственной неоднородности) течений, что, в свою очередь, существенно усложняет численное

моделирование распространения и горения пароводородновоздушных газовых смесей в условиях тяжелых аварий [7, 8]. В связи с этим авторами сделан вывод о некорректности использования имеющихся в методиках численных значений частот реализации аварийных и пожароопасных ситуаций.

К таким методикам относятся следующие документы:

– приказ Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»;

– приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности»;

– приказ МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах»;

– ГОСТ Р 54142–2010 «Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Методология построения универсального дерева событий»;

– приказ Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 415 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах»;

– приказ Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 410 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных газов»;

– приказ Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 411 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных жидкостей»;

– приказ Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 414 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности»;

– приказ Ростехнадзора от 12 сентября 2023 г. № 331 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика установления допустимого риска аварии при обосновании безопасности опасных производственных объектов нефтегазового комплекса»;

– приказ Ростехнадзора от 22 декабря 2022 г. № 454 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа»;

– приказ Ростехнадзора от 29 декабря 2022 г. № 478 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов»;

– приказ Ростехнадзора от 17 февраля 2023 г. № 69 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на конденсаторопроводах и продуктопроводах»;

– приказ Ростехнадзора от 25 июля 2023 г. № 276 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах».

За последнее десятилетие опубликовано множество научных исследований, связанных с оценкой рисков и расчета вероятностей аварий на объектах водородной энергетики [9–17], среди которых имеются публикации, касающиеся анализа имеющихся статистических баз данных аварий и инцидентов [18]. Однако среди них отсутствуют исследования, направленные на оценку частот реализации аварийных событий на объектах производства и обращения водорода и его смесей с горючими газами на основе анализа статистических данных по аварийности.

Методы исследования

Целью исследования является определение расчетных показателей по частотам реализации аварийных событий в зависимости от типа оборудования объектов, отрасли промышленности и поражающего эффекта на объектах производства и обращения водорода. Для этого была использована база данных водородных инцидентов и аварий (HIAD) – международная открытая коммуникационная платформа, созданная Европейской комиссией по безопасности водорода (EHSP) при поддержке Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии (JRC) и Совместного предприятия по производству топливных элементов и водорода (FCN JU). Данный инструментарий проводит сбор и хранение статистических данных об авариях и инцидентах, связанных с получением и хранением водорода [19], причем указанная международная открытая коммуникационная платформа представляет собой одну из крупнейших, существующих в настоящее время, баз данных по водороду.

База данных об инцидентах, связанных с водородом, «HIAD» представлена в виде файла EXCEL, обеспечивающего визуализацию данных и настраиваемые пользователем аналитические функции. Инструментарий таблицы Excel включает в себя следующие категории в виде электронных листов: происшествия, объекты, последствия, извлеченные уроки, характер происшествия, источники (ссылки).

Каждый лист содержит в себе различные классификаторы в виде выпадающих списков. Визуализация инструмента HIAD показана на рис. 1.

Event ID	Event Title	Event full description	Event initiating system	Classification of the physical effects	Nature of the consequent	Region	Country	Date	Causes	Cause comments
57	Hydrogen fire from a liquid hydrogen transporter	The vent occurred outside a fuel cells manufacturing facility. While preparing for transfer of liquid hydrogen from tanker truck to storage tank, a release of hydrogen occurred, which vaporized into a hydrogen cloud and ignited in a flash fire and concussion loud enough to be heard inside the nearby building (the building's seismic event detectors went off). A small amount of hydrogen gas continued to escape from the trailer tank and burn for almost eight hours, until a specialist of the truck delivery company arrived to manually shut off a critical valve. In the meantime, emergency response crews called to the scene sprayed water across the hydrogen tank as a precautionary cooling measure. As described in the PRESLHY report (see references), the driver had just terminated a first unloading of the tank. The manual valve connecting the trailer to stationary storage was apparently left in an open position after the first unloading. The driver next failed to perform the required procedure of seven purges intended to eliminate contaminants and water from the piping before connecting the hose for the second unloading. He then opened the pneumatic valve before connecting the hose, which, due to the open manual valve, resulted in a direct release of liquid hydrogen into the ambient air. The liquid immediately vaporized into a hydrogen cloud and quickly ignited.	Hydrogen system initiating event	Hydrogen release and ignition	Explosion	North America	CANADA	2004-08-06	Management factors	The immediate cause of the ignition is thought that a static electricity built up by the rush of vaporizing gas. According to the PRESLHY report (see references) the root cause was probably an error of the truck driver, who omitted or applied incorrectly a number of steps required as part of standard safety procedure.
58	Liquid hydrogen release from a rail tanker	The whole content of the rail tanker, that is 42,000l (about 2600 kg) of liquid hydrogen, was entirely lost over a period of seven hours via the venting line of a tank. The accident occurred at a railway station, and the wagon with the tank that had been uncoupled from the goods train and shunted to a siding to allow the release of its content. The cryogenic tank was of the Dewar type with numerous insulating and reflecting layers in its inter-space, kept under vacuum. According to the source referenced, a micro-crack in the outer wall of the tank caused the loss of the vacuum and was the initiating event of the release. The crack caused the loss of the interspace vacuum and of the related thermal insulation function, with a quick increase of the conductive and convective heat transfer between the tank interior and the environment. The liquid and vapour hydrogen raised the internal pressure to the design value of the safe valves (4). The valves are designed to maintain a constant 12 bar pressure differential between the upstream and downstream sides of their shutter (thus the max pressure attained inside the tank during the accident was 13 bar).	Hydrogen system initiating event	Unignited Hydrogen Release	Leak no ignition	Europe	ITALY	1991-07-09	Material/manufacturing error	Immediate cause was the cracking of the external layer of the cryogenic tank. A contributing (or root) cause was probably a (materials, safety?) design shortcoming.

Рис. 1. Фрагмент программы HIAD в виде таблицы Excel

HIAD была создана с целью дать количественную оценку аварийности объектов водорода, а также последствий социальных, экологических и экономических потерь [20], что достигается в процессе сбора данных, их обработки, проверки, анализа, отчетности и окончательной публикации.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе анализа статистических данных за последние 15 лет было выявлено, что наибольшее количество аварий на объектах производства и обращения водорода произошло в 2018 г. (25 аварий), наибольшее количество пострадавших на данных объектах пришлось на 2010 г. (23 чел.), наибольшее количество погибших на данных объектах пришлось на 2021 г. (22 чел.) (рис. 2).

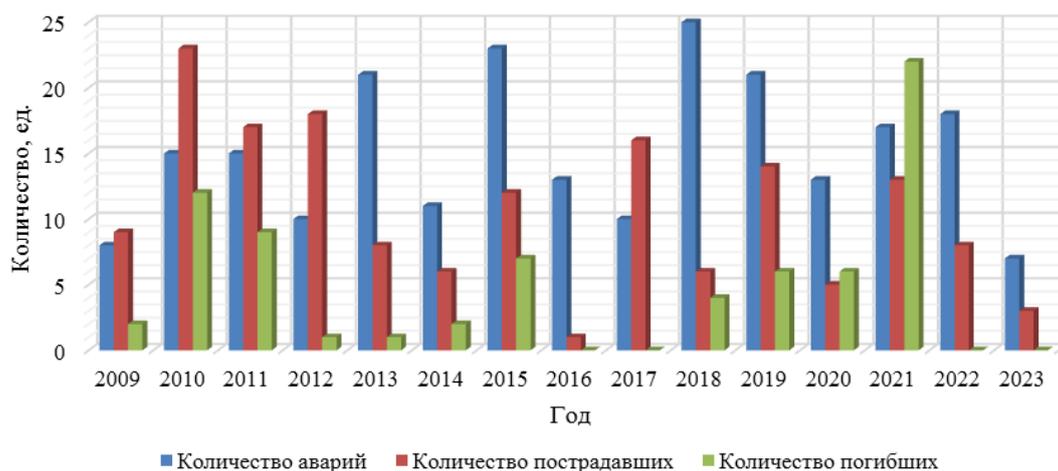


Рис. 2. Динамика аварийности на объектах производства и обращения водорода

Всего в период 2009–2023 гг. на объектах производства и обращения водорода и его смесей с горючими газами произошло 233 аварии, в результате которых было 159 травмированных и 72 летальных исходов (табл. 1).

Таблица 1

Сведения по аварийности, пострадавших и погибших на объектах производства и обращения водорода в период 2009–2023 гг.

Год	Количество аварий	Количество пострадавших	Количество погибших
2009	11	9	2
2010	15	23	12
2011	15	17	9
2012	10	18	1
2013	21	8	1
2014	11	6	2
2015	23	12	7
2016	13	1	0
2017	13	16	0
2018	25	6	4
2019	21	14	6
2020	13	5	6
2021	17	13	22
2022	18	8	0
2023	7	3	0
Всего	233	159	72

Почти половина этих инцидентов произошла в Европе, а одна треть – в Северной Америке. На Азию приходится около шестой части инцидентов, в то время как на другие регионы приходится всего 3 % зарегистрированных инцидентов (рис. 3).

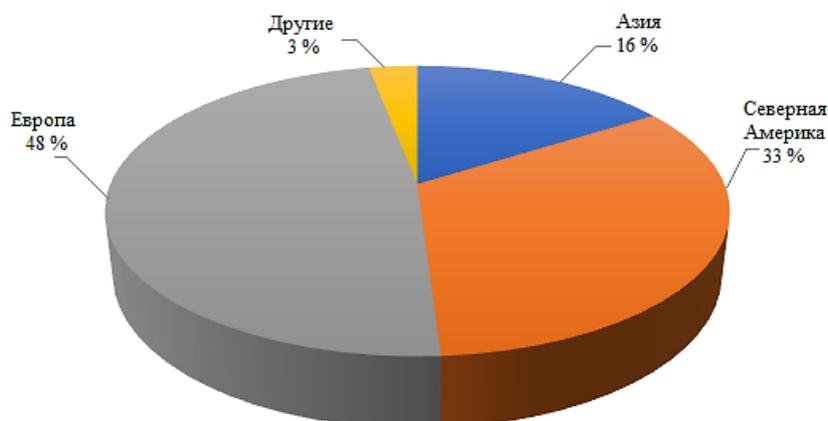


Рис. 3. Диаграмма аварийности на объектах производства и обращения водорода в зависимости от регионов

В период 2009–2023 гг. на объектах производства и обращения водорода произошло 65 взрывов, 56 пожаров, 43 аварийных утечек и 69 потенциальных угроз аварий (табл. 2).

Таблица 2

Динамика аварийности на объектах производства и обращения водорода по поражающим эффектам

Поражающий эффект	Количество произошедших эффектов
Взрыв	65
Пожар	56
Утечка без воспламенения	43
Угроза аварии	69
Всего	233

В целом взрывы произошли в 28 % случаев, пожары – 24 % случаев, 18 % – утечки без воспламенения и в 30 % водородные системы переходили в аварийный режим работы, но аварии не случалось (рис. 4).

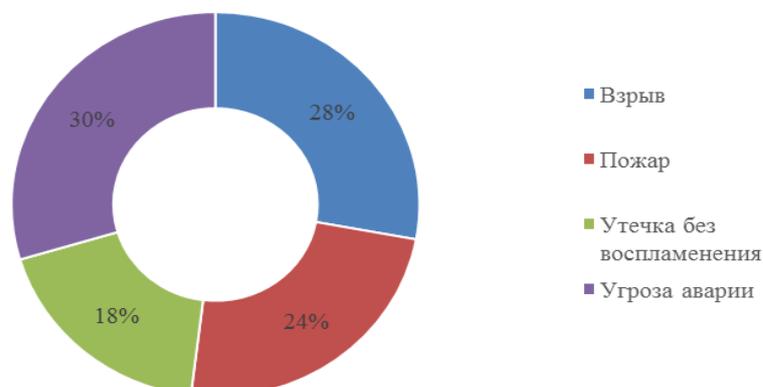


Рис. 4. Диаграмма аварийности на объектах производства и обращения водорода по поражающим эффектам

18 % инцидентов утечек без воспламенения объяснялись рядом причин, например, тем, что непреднамеренные выбросы были своевременно ликвидированы, а также осуществлялся эффективный контроль за горючими веществами и источниками воспламенения.

30 % инцидентов угроз аварий свидетельствует о том, что раннее обнаружение и оперативные действия по снижению потенциальных выбросов позволяют успешно избежать крупных выбросов водорода.

Что касается секторов и отраслей промышленности, за последние 15 лет в мире на объектах производства и обращения водорода больше всего аварий произошло в химической и нефтехимической отрасли (82 случая), второе место по аварийности занимают транспортные средства на водороде (54 случая), на третьем – транспортировка водорода и распределительные сети (46 случаев). В табл. 3 представлен обзор аварийных событий, классифицированных по отраслям.

Таблица 3

Количество аварийных событий по отраслям промышленности

Сектор	Количество событий по секторам
Химическая/нефтехимическая промышленность	82
Транспортировка и распределительные сети	46
Атомная электростанция	8
Лаборатория/НИОКР	8
Хранение водорода	2
Производство водорода	7
Транспортные средства на водороде	54
Стационарные топливные элементы	2
Другое/Неизвестное	12
Всего	233

Примечание: НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа

На рис. 5 показан процент событий, произошедших в различных промышленных секторах. Среди различных секторов наибольшая доля происшествий приходится на химическую и нефтехимическую промышленность – 35 %. За ней следуют транспортные средства на водороде – 23 %, транспортировка и распределительные сети водорода – 20 %, водородные заправочные станции – 4 %. На остальные рассматриваемые отрасли приходится лишь небольшая доля.

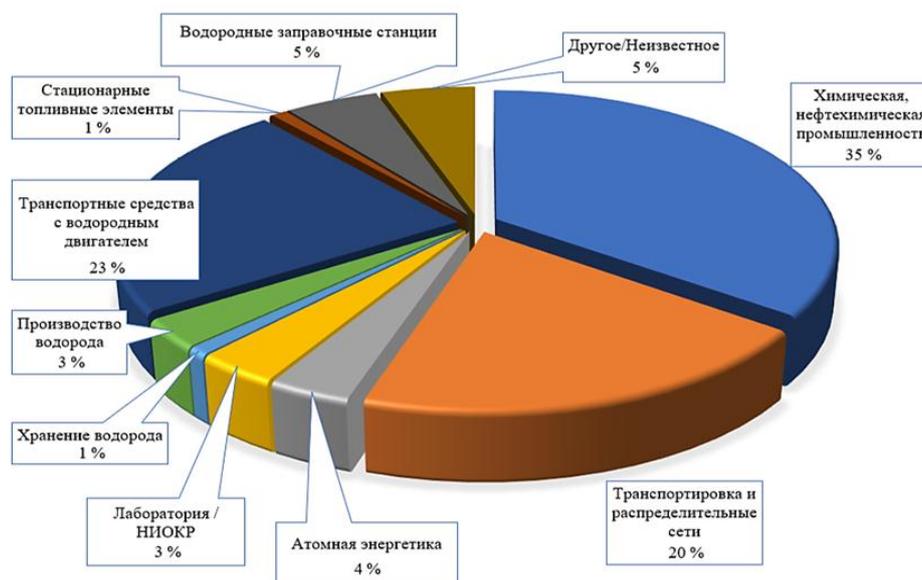


Рис. 5. Диаграмма аварийности на объектах производства и обращения водорода по промышленным секторам

В период 2009–2023 гг. на объектах производства и обращения водородсодержащего газа с участием различного оборудования и аппаратов наиболее аварийными аппаратами оказались технологические аппараты под давлением, такие как автоклавы, газовые двигатели, научные установки и др. (76 происшествий), второе место по аварийности занимает транспорт (50 происшествий), на третьем – резервуары, емкости, сосуды (45 происшествий) (табл. 4).

Таблица 4

Аварийные события, представленные в НИАД 2.1 и классифицированные по технологическому оборудованию за последние 15 лет

Наименование оборудования	Количество аварийных событий с участием оборудования
Резервуары, емкости, сосуды	45
Компрессоры, насосы	14
Технологические аппараты под давлением	76
Транспорт	50
Химические реакторы	13
Технологические трубопроводы	28
Технологическое оборудование с жидким водородом	7
Всего	233

Примечание: в раздел «технологические аппараты под давлением» вошли следующие водородные агрегаты и оборудование: сепаратор под давлением; линия синтез-газа; реактор блок риформинга; теплообменник; факельная установка; печь для обжига металлов; теплообменник; установка облагораживания бензина; теплообменник нефтеперегонной установки; высоковольтный трансформатор; каталитический электролизер; генератор; установка сероочистки дизельного топлива; дозатор градирни; щелочной электролизер; установка для производства аммиака; теплообменник реактора синтеза аммиака; водородный трубчатый автоклав

На рис. 6 представлено процентное соотношение аварийных событий, произошедших в классифицированные по участию технологического оборудования и аппаратов. Среди различных аппаратов наибольшая доля аварий приходится на технологические аппараты под давлением – 33 %. За ними следуют транспортные средства на водороде – 21 %, транспортировка и распределительные сети водорода – 21 %, резервуары, емкости, сосуды – 19 %. На остальные рассматриваемые отрасли приходится лишь небольшая доля.

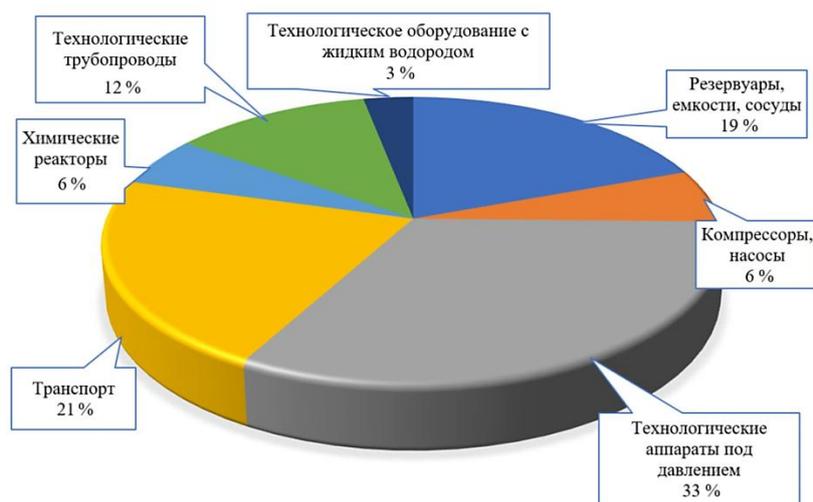


Рис. 6. Диаграмма аварийности на объектах производства и обращения водорода по технологическому оборудованию и аппаратам

На основе представленных статистических данных по аварийности определены частоты реализации пожароопасных и аварийных ситуаций в зависимости от типов оборудования объектов, поражающих эффектов и различных секторов объектов производства (обращения) водорода и водородсодержащих смесей газов (табл. 5–7).

Таблица 5

Частоты реализации аварийных событий для некоторых типов оборудования объектов на объектах производства и обращения водорода

Наименование оборудования	Частота возникновения аварии
Резервуары; емкости, сосуды	$5,95238 \cdot 10^{-5}$
Компрессоры, насосы	$1,85185 \cdot 10^{-5}$
Технологические аппараты под давлением	$0,0001 \cdot 10^{-4}$
Транспорт	$6,61376 \cdot 10^{-5}$
Химические реакторы	$1,71958 \cdot 10^{-5}$
Технологические трубопроводы	$3,7037 \cdot 10^{-5}$
Технологическое оборудование с жидким водородом	$9,25926 \cdot 10^{-6}$

Примечание: частоты утечек из технологических аппаратов и оборудования не были оценены, поскольку отсутствует статистическая информация по диаметрам отверстия истечения, а также полном или неполном разрушении аппаратов

Таблица 6

Частоты реализации поражающих эффектов на объектах производства и обращения водорода

Поражающий эффект	Частота возникновения эффекта
Взрыв	$8,59788 \cdot 10^{-5}$
Пожар	$7,40741 \cdot 10^{-5}$
Утечка без воспламенения	$5,68783 \cdot 10^{-5}$
Угроза аварии	$9,12698 \cdot 10^{-5}$

Примечание: частота реализации сценариев, связанных с образованием огненного шара на технологическом оборудовании, не рассчитывалась, поскольку отсутствует статистическая информация по данным эффектам на рассматриваемых объектах

Частоты реализации аварийных событий на различных секторах объектов производства и обращения водорода

Сектор	Частота реализации аварии
Химическая/нефтехимическая промышленность	$1,08466 \cdot 10^{-4}$
Транспортировка и распределительные сети	$6,08466 \cdot 10^{-4}$
Атомная энергетика	$1,0582 \cdot 10^{-5}$
Лаборатория/НИОКР	$1,0582 \cdot 10^{-5}$
Хранение водорода	$2,6455 \cdot 10^{-6}$
Производство водорода	$9,25926 \cdot 10^{-5}$
Транспортные средства с водородным двигателем	$7,14286 \cdot 10^{-4}$
Стационарные топливные элементы	$2,6455 \cdot 10^{-5}$
Водородные заправочные станции	$1,5873 \cdot 10^{-5}$
Другое/Неизвестное	$1,5873 \cdot 10^{-5}$

Заключение

На момент проведения исследования в базе данных было 756 событий, произошедших в период с 1963 по 2023 г., а также несколько исторических аварийных событий до 1963 г. (в 1785, 1894, 1937 и 1960 гг.).

Расчеты частот, проведенные в данном исследовании, основаны на 233 событиях (за последние 15 лет), которые были в базе данных в апреле 2024 г. Полученные данные могут быть использованы при проведении расчета риска в соответствии методиками, установленными нормативными документами.

Поскольку при анализе использовалась только оцифрованная статистика, без данных по условиям возникновения и тяжести последствий аварий, трудно констатировать причины увеличения/снижения аварийности на рассматриваемых объектах из-за различия в технологичности производств и разнородности нормативных требований к промышленной и пожарной безопасности объектов.

Следует также иметь в виду, что, вероятнее всего, на практике могло произойти больше случаев различных инцидентов (невоспламенившихся выбросов и т.д.), чем указано в отчетах, поскольку они не были обнаружены или о них не было сообщено.

Список источников

1. Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: приказ Ростехнадзора от 3 нояб. 2022 г. № 387 // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300154647> (дата обращения: 07.04.2024).

2. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: приказ МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».

3. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору // Официальный сайт федеральной службы

- по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 23.04.2024).
4. Итоги деятельности МЧС России // Официальный сайт МЧС России. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii> (дата обращения: 23.04.2024).
5. Информационные системы, реестры, базы и банки данных, сборники // ФГБУ ВНИИПО МЧС России. URL: <https://vniipo.ru/institut/informatsionnye-sistemy-reestry-bazy-i-banki-danny/> (дата обращения: 23.04.2024).
6. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов. М.: ВНИИПО МЧС России, 2012. 242 с.
7. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы / И.А. Кириллов [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 2 (84). С. 26–37.
8. Григорьев С.Ю. Моделирование процессов конвективного перемешивания и пристеночного массообмена в задачах анализа водородной безопасности АЭС при тяжелой аварии: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2017. 22 с.
9. Моделирование волн давления при дефлаграционном горении облаков топливно-воздушных смесей / С.И. Сумской [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 1. С. 15–22. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-15-22.
10. Егоров А.А., Тимошенко А.Л., Фомин А.В. Оценка пожарного риска на водородных заправочных станциях // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе: материалы Междунар. конф. 2022. С. 213.
11. Аминов Р.З., Бурденкова Е.Ю., Портянкин А.В. Методика оценки годового риска от поломок, пожаров и взрывов на основе графов состояний в электролизных цехах // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11. № 4. С. 305–310. DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-4-305-310.
12. Аминов Р.З., Портянкин А.В. Анализ компоновочных решений электролизного цеха водородной надстройки с учетом надежности и взрывопожароопасности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 5-6. С. 29–36.
13. Quantitative risk assessment of hydrogen gas explosion accidents at complex hydrogen refueling station / Park Byoungjik [et al.] // Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 2023. № 23. P. 71–77. DOI: 10.9798/KOSHAM.2023.23.5.71.
14. Safety investigation of hydrogen energy storage systems using quantitative risk assessment / Le Son [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. № 48. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.082.
15. Jafari Mohammad Javad, Zarei Esmaeil, Badri Naser. The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. № 37. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.082.
16. Risk assessment of fire and explosion accidents in oil-hydrogen fueling station based on fault tree analysis / Du Lianming [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2024. № 2723. P. 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/2723/1/012005.
17. Jang Dae-Jin, Kim Seo-Yeon, Lee Min. Property based Quantitative Risk Assessment of Hydrogen Compared with Methane, Ethane, Propane and Butane // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B. 2022. № 46 (2). P. 103–114. DOI: 10.3795/KSME-B.2022.46.2.103.
18. Alfasfos Rami, Sillman Jani, Soukka Risto. Lessons learned and recommendations from analysis of hydrogen incidents and accidents to support risk assessment for the hydrogen economy // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. № 60. P. 1203–1214. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.226.
19. Joint Research Centre Data Catalogue // European Commission, Joint Research Centre (JRC) (2023): HIAD 2.1. European Commission, Joint Research Centre (JRC). URL:

<https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/1d6b06e9-3a89-4ec2-b051-3fb8a28eab9f> (дата обращения: 23.04.2024).

20. Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database / Wen Jennifer [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. № 47. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.170.

References

1. Ob utverzhdenii Rukovodstva po bezopasnosti «Metodicheskie osnovy analiza opasnostej i oenki riska avarij na opasnyh proizvodstvennyh ob"ektah: prikaz Rostekhnadzora ot 3 noyab. 2022 g. № 387 // *Elektronnyj fond pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300154647> (дата обращения: 07.04.2024).

2. Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyh ob"ektah: prikaz MCHS Rossii ot 10 iyulya 2009 g. № 404. Dostup iz inf.-pravovogo portala «Garant».

3. Ezhegodnye otchety o deyatel'nosti Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru // *Oficial'nyj sajt federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru*. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 23.04.2024).

4. Itogi deyatel'nosti MCHS Rossii // *MCHS Rossii*. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii> (дата обращения: 23.04.2024).

5. Informacionnye sistemy, reestry, bazy i banki dannyh, sborniki // *Oficial'nyj sajt FGBU VNIPO MCHS Rossii*. URL: <https://vniipo.ru/institut/informacionnye-sistemy-reestry-bazy-i-banki-dannyh/> (дата обращения: 23.04.2024).

6. Posobie po opredeleniyu raschetnyh velichin pozharnogo riska dlya proizvodstvennyh ob"ektov. M.: VNIPO MCHS Rossii, 2012. 242 s.

7. Obespechenie vodorodnoj bezopasnosti na atomnyh elektrostanciyah s vodoohlazhdaemyimi reaktornymi ustanovkami. *Sovremennoe sostoyanie problemy* / I.A. Kirillov [i dr.] // *Yademaya i radiacionnaya bezopasnost'*. 2017. № 2 (84). S. 26–37.

8. Grigor'ev S.Yu. Modelirovanie processov konvektivnogo peremeshivaniya i pristenochnogo massoobmena v zadachah analiza vodorodnoj bezopasnosti AES pri tyazhelej avarii: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. M., 2017. 22 s.

9. Modelirovanie voln davleniya pri deflagracionnom gorenii oblakov toplivno-vozdushnyh smesej / S.I. Sumskoj [i dr.] // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2023. № 1. S. 15–22. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-15-22.

10. Egorov A.A., Timoshenko A.L., Fomin A.V. Ocenka pozharnogo riska na vodorodnyh zapravochnykh stanciyah // *Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy*. Arktika – region strategicheskikh interesov: pravovaya politika i sovremennye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti v Arkticheskom regione: materialy Mezhdunar. konf. 2022. S. 213.

11. Aminov R.Z., Burdenkova E.Yu., Portyankin A.V. Metodika oenki godovogo riska ot polomok, pozharov i vzryvov na osnove grafov sostoyanij v elektroliznykh cekhah // *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2018. T. 11. № 4. S. 305–310. DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-4-305-310.

12. Aminov R.Z., Portyankin A.V. Analiz komponovochnykh reshenij elektroliznogo cekha vodorodnoj nadstrojki s uchetom nadezhnosti i vzryvopozharoopasnosti // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki*. 2018. T. 20. № 5-6. S. 29–36.

13. Quantitative risk assessment of hydrogen gas explosion accidents at complex hydrogen refueling station / Park Byoungjik [et al.] // *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2023. № 23. P. 71–77. DOI: 10.9798/KOSHAM.2023.23.5.71.

14. Safety investigation of hydrogen energy storage systems using quantitative risk assessment / Le Son [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. № 48. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.082.

15. Jafari Mohammad Javad, Zarei Esmaeil, Badri Naser. The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. № 37. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.082.

16. Risk assessment of fire and explosion accidents in oil-hydrogen fueling station based on fault tree analysis / Du Lianming [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. № 2723. P. 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/2723/1/012005.

17. Jang Dae-Jin, Kim Seo-Yeon, Lee Min. Property based Quantitative Risk Assessment of Hydrogen Compared with Methane, Ethane, Propane and Butane // *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B*. 2022. № 46 (2). P. 103–114. DOI: 10.3795/KSME-B.2022.46.2.103.

18. Alfasfos Rami, Sillman Jani, Soukka Risto. Lessons learned and recommendations from analysis of hydrogen incidents and accidents to support risk assessment for the hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. № 60. P. 1203–1214. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.226.

19. Joint Research Centre Data Catalogue // European Commission, Joint Research Centre (JRC) (2023): HIAD 2.1. European Commission, Joint Research Centre (JRC). URL: <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/1d6b06e9-3a89-4ec2-b051-3fb8a28eab9f> (data obrashcheniya: 23.04.2024).

20. Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database / Wen Jennifer [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. № 47. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.170.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 25.04.2024; одобрена после рецензирования: 13.05.2024; принята к публикации: 17.05.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 25.04.2024; approved after review: 13.05.2024; accepted for publication: 17.05.2024

Информация об авторах:

Тимошенко Артем Леонидович, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: artem18181@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3927-5613>, SPIN-код: 6923-0111

Самигуллин Гафур Халафович, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: samigullin.g@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>, SPIN-код: 8830-4253

Ребезов Сергей Александрович, курсант Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196106, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: srebezoff@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6636-2520>

Information about the authors:

Timoshenko Artem L., postgraduate student of the faculty of training of highly qualified personnel of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: artem18181@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3927-5613>, SPIN: 6923-0111

Samigullin Gafur Kh., professor of the department of physical and chemical basis of combustion and extinguishing of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: samigullin.g@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>, SPIN: 8830-4253

Rebezov Sergey A., student of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196106, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: srebezoff@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6636-2520>