

УДК 614.84

В. И. Медведев, З. П. Ощепков, М. Г. Рублев

Анализ защищенности критически важных объектов железнодорожного транспорта и обеспечение безопасности персонала

Поступила	21.12.2017
Рецензирование	26.01.2018
Принята к печати	16.02.2018

Статья посвящена проблеме обеспечения безопасности и надежности объектов нефтепродуктообеспечения железнодорожного транспорта. Они играют чрезвычайно важную роль в поддержании устойчивости работы транспорта, обеспечивая функционирование всех технологических транспортных процессов: как самого перевозочного процесса, так и обеспечивающей его инфраструктуры. Такие объекты, как правило, относятся к критически важным объектам железнодорожного транспорта, стратегической его подсистеме, и требуют особых условий безопасности.

Данные объекты несут высокую потенциальную опасность из-за сконцентрированных в них высоких запасов тепловой и кинетической энергии углеводородов. Нарушение безопасного режима эксплуатации подобных объектов нередко приводило (и в нашей стране, и за рубежом) к техногенным катастрофам – пожарам и взрывам, в том числе сопровождающимся взрывной волной, со значительным ущербом. Проведен статистический анализ обстоятельств чрезвычайных ситуаций на предприятиях нефтепродуктообеспечения и определены группы вызывающих их причин. На основании типовых сценариев развития аварий, связанных с нефтепродуктами, для основных технологических блоков рассматриваемого объекта построены «деревья событий», позволяющие выявить слабые места системы защиты с последующей оценкой вероятности их реализации и ранжированием. Представлен метод проведения анализа рисков аварий на опасном производственном объекте.

Результаты расчетов показали, что такие элементы критически важных объектов транспорта, как резервуары и вагоны-цистерны, несмотря на предпринимаемые усилия со стороны компании-владельца и государства, обладают повышенным риском, поэтому необходима разработка и реализация дополнительных мероприятий: технических, технологических, организационных и кадровых. Полученные сведения служат основанием для проведения дальнейших расчетов по прогнозированию потенциальных чрезвычайных ситуаций на объекте, а также определению количественной величины риска для обслуживающего персонала.

Ключевые слова: анализ рисков, безопасность персонала, железнодорожный транспорт, критически важные объекты, надежность, объекты транспортной инфраструктуры, оценка рисков, чрезвычайные ситуации.

Устойчивая работа железнодорожного транспорта во многом зависит от обеспечения материально-техническими ресурсами всех его объектов. Неотъемлемой частью системы материально-технического обеспечения железнодорожного транспорта являются базы топлива, обеспечивающие потребности линейных предприятий дороги в топливе и нефтепродуктах. Под базой топлива понимается комплекс объектов, сфера деятельности которых охватывает цикл транспортировки, переработки, хранения и отпуска нефтепродуктов. В состав перечисленных объектов входит оборудование двух типов: динамическое (насосы, компрессоры) и статическое (резервуарные группы, технологические трубопроводы, топливораздаточные колонки).

Указанные объекты являются источниками высокой техногенной опасности, по-

скольку их эксплуатация связана с переработкой значительных объемов взрыво- и пожароопасных веществ, а также с аккумулярованием значительных запасов упругой, кинетической, тепловой, акустической и вибрационной энергии транспортируемых или перерабатываемых углеводородов.

Влияние указанных источников техногенной опасности проявилось в России и за рубежом при крупных катастрофах на объектах нефтепродуктообеспечения [1, 2].

Проблема обеспечения надежности объектов нефтепродуктообеспечения осложняется постоянным увеличением процента износа резервуарных групп и технологического оборудования. В настоящее время на балансе предприятий нефтепродуктообеспечения Российской Федерации находится более 80 % резервуаров, требующих проведения капитального

ремонта [3]. Существующие проблемы в полной мере касаются соответствующих объектов железнодорожного транспорта.

Статистические данные о причинах возникновения чрезвычайных ситуаций на наземных резервуарах приведены на рис. 1. Так, основными источниками инициирования пожаров являются: проведение огневых и ремонтных работ (24 %), электрические искры электроустановок (15 %), разряды статического электричества (10 %), атмосферное электричество (9 %). Большая часть всех пожаров на резервуарных группах происходит по причине самовозгорания пиррофорных отложений, неосторожного обращения с огнем, поджогов других источников зажигания (42 %) [4, 5].

Рассмотрение обстоятельств аварий на нефтебазах позволяет выделить следующие причины возникновения происшествий:

1. Неполное знание сектора эксплуатационных нагрузок и механизмов достижения предельных состояний.
2. Отсутствие учета изменений физико-механических свойств конструкционных материалов в процессе эксплуатации.
3. Ошибки операторов и персонала (в том числе ошибки проектирования, нарушение технологий строительства, эксплуатации и ремонта).
4. Несанкционированное воздействие на объект со стороны третьих лиц (или объектов).

Анализ опасности конкретного производственного объекта заключается в построении множества (совокупности) сценариев возникновения и развития возможных аварий на объекте с последующей оценкой частот реализации каждого из сценариев и определением

масштабов последствий их развития. Такой подход открывает путь к проектированию систем защиты объекта и обслуживающего его персонала, учитывающих реальные угрозы.

Теория и практика показывают, что крупные аварии, как правило, характеризуются комбинацией случайных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях возникновения и развития аварии. Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы анализа «дерева отказов» и «дерева событий».

Процесс составления «дерева отказов» состоит в определении последовательностей нарушений и неисправностей основных структурных элементов системы. Произведем построение «дерева отказов» для объекта нефтепродуктообеспечения железнодорожного транспорта с целью определения возможных причин возникновения аварийных ситуаций и значений уровня опасности основных технологических объектов. Путем выполнения предварительного анализа опасностей выявлено, что критической частью рассматриваемого объекта, т. е. подсистемой, с которой начинается риск, является инцидент пролива нефтепродукта.

Для более строгого и систематического анализа в разрабатываемой системе «дерева отказов» выделим основные составляющие объекты: вагон-цистерна, насосное оборудование, резервуары хранения нефтепродуктов, объекты топливозадачи.

Информация о частотах реализации аварийных ситуаций, необходимая для построения «дерева отказов», получена из данных о



Рис. 1. Источники инициирования пожаров

функционировании подобных объектов (нефтебаз). На основе информации, приведенной в научно-технической литературе [4, 6], составлена таблица, в которую сведены показатели частоты отказов элементов технических систем.

Основываясь на приведенной информации, произведем оценку вероятности разгерметизации вагона-цистерны с нефтепродуктом.

На рис. 2 приведен пример построения «дерева отказа» для структурного элемента системы объекта нефтепродуктообеспечения. Полученная вероятность разгерметизации вагона-цистерны составляет $P_A^{ВЦ} = 1,76 \cdot 10^{-5}$.

Аналогичным образом произведена оценка остальных составляющих объекта. На рис. 3 представлена гистограмма выявленной вероятности отказов основного оборудования рассматриваемого объекта.

Имея значения вероятностей первичных отказов основного технологического оборудования, определим количественную величину для завершающего нежелательного последствия (пролив нефтепродуктов) всей системы (рис. 4). Используя распределительный закон булевой алгебры, получим частоту реализации «головного инцидента» аварии:

$$P_A = 1,76 \cdot 10^{-5} + 2,34 \cdot 10^{-4} + 1,48 \cdot 10^{-4} + 9,06 \cdot 10^{-5} = 4,90 \cdot 10^{-4}.$$

Исходя из проведенного анализа развития аварийных ситуаций на рассматриваемом объекте, установления условий их возникновения и вероятности реализации произведен расчет для типовых сценариев возможных аварий. Для определения последовательности событий при аварии, включающей сложные взаимодействия между составными частями технической системы, используют «дерево событий» [7, 8].

Частота отказов элементов технических систем

Причина разрушения	Частота, год ⁻¹
<i>Железнодорожный вагон-цистерна</i>	
Усталостные явления в металле корпуса или коррозия металлов	$2,09 \cdot 10^{-6}$
Хрупкое разрушение при низких температурах	$1,78 \cdot 10^{-6}$
Механические разрушения, концентрация напряжений в зоне сварного шва и др.	$7,16 \cdot 10^{-6}$
Сход вагона-цистерны с рельс	$1,99 \cdot 10^{-6}$
Умышленные действия третьих лиц	$2,99 \cdot 10^{-7}$
Воздействие ударной волны вследствие взрыва топливно-воздушной смеси (ТВС)	$2,15 \cdot 10^{-6}$
Стихийные бедствия	$5,97 \cdot 10^{-7}$
Воздействие высоких температур при пожаре	$1,53 \cdot 10^{-6}$
<i>Наземный резервуар с нефтепродуктами</i>	
Механические разрушения при износе конструкций, дефектах сварного шва, неравномерности просадки оснований фундаментов, наличии большого числа сварных швов в отдельных узлах	$8,55 \cdot 10^{-5}$
Хрупкое разрушение при низких температурах	$2,83 \cdot 10^{-5}$
Коррозия	$2,16 \cdot 10^{-5}$
Воздействие высоких температур при пожарах	$1,42 \cdot 10^{-6}$
Диверсионный акт	$0,28 \cdot 10^{-5}$
Воздействие ударной волны вследствие взрыва ТВС	$2,15 \cdot 10^{-6}$
Стихийные бедствия	$5,97 \cdot 10^{-7}$
Воздействие высоких температур при пожаре	$1,42 \cdot 10^{-6}$
<i>Насосное оборудование</i>	
Усталостные явления в сварных швах трубопроводов и оборудования, коррозия металлов	$2,43 \cdot 10^{-5}$
Механические разрушения, концентрация напряжений в зоне сварного шва и др.	$1,08 \cdot 10^{-4}$
Ошибки оперативного персонала	$4,77 \cdot 10^{-5}$
Умышленные действия третьих лиц	$3,51 \cdot 10^{-6}$
Воздействие ударной волны вследствие взрыва ТВС	$2,53 \cdot 10^{-5}$
Стихийные бедствия	$7,02 \cdot 10^{-6}$
Воздействие высоких температур при пожаре	$1,80 \cdot 10^{-5}$
<i>Топливораздаточный участок</i>	
Механические разрушения	$1,17 \cdot 10^{-6}$
Усталостные явления или коррозия металлов	$2,07 \cdot 10^{-6}$
Нарушение режимов эксплуатации	$1,99 \cdot 10^{-6}$
Отказ системы раздачи топлива	$8,32 \cdot 10^{-5}$

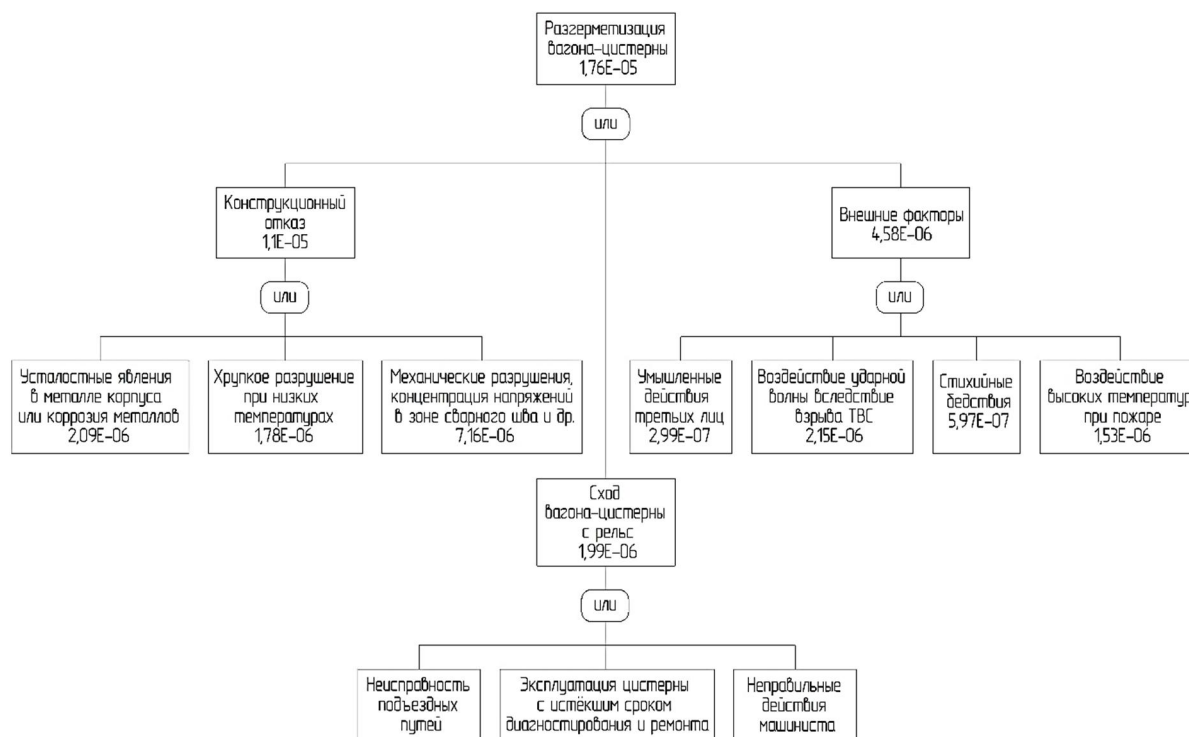


Рис. 2. «Дерево отказов» элемента «вагон-цистерна»

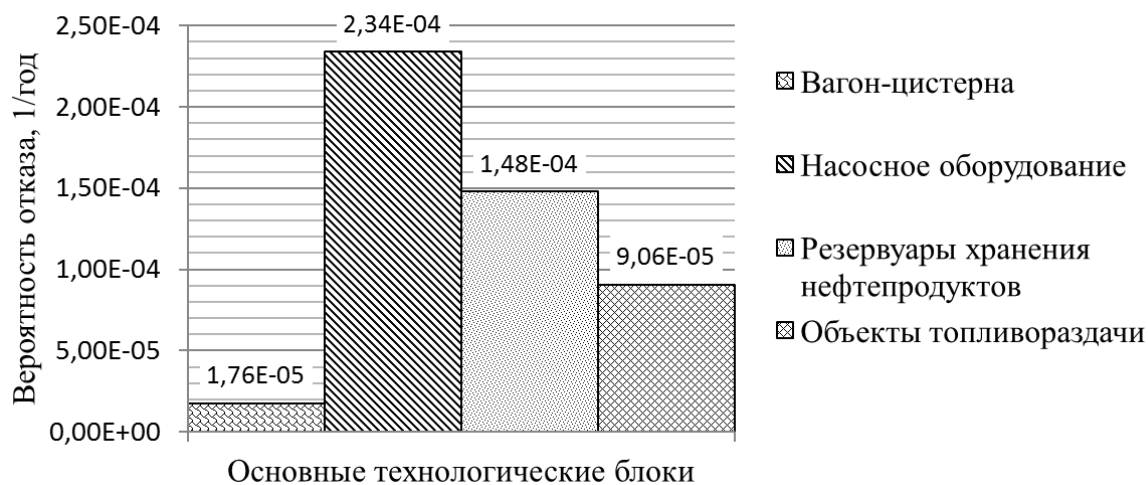


Рис. 3. Выявленная вероятность отказа основного оборудования

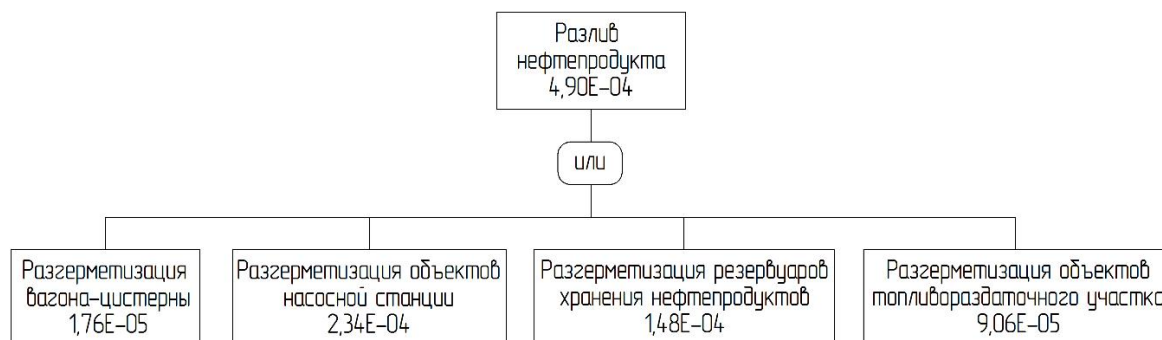


Рис. 4. «Дерево отказов» технологической системы

Исходя из принятых границ предшествующих событий «головного инцидента», выполнено построение «дерева событий» при аварийной ситуации на основном оборудовании рассматриваемого объекта.

Анализ начинается с просмотра последовательности возможных событий с момента разгерметизации вагона-цистерны, вероятность которой определена на «дереве отказов» и равна $P_A^{ВЦ} = 1,76 \cdot 10^{-5}$. Далее проведен анализ возможных вариантов развития событий, которые могут последовать за разгерметизацией цистерны. Частота каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается путем умножения частоты основного события на условную вероятность конечного события, определяемую на основании статистических данных.

Построение «дерева событий» развития аварийной ситуации при разгерметизации вагона-цистерны с нефтепродуктом приведено на рис. 5.

Каждая аварийная ситуация имеет несколько стадий развития. При сочетании определенных условий аварийная ситуация может

перейти в следующую стадию развития. При этом выделяются следующие уровни развития аварий:

- уровень А – характеризуется возникновением и развитием аварийной ситуации в пределах одного технологического блока без влияния на смежный;
- уровень Б – характеризуется развитием аварийной ситуации с выходом за пределы блока, установки.

С учетом вышеизложенного на основании результатов расчетов вероятности реализации различных сценариев развития аварийных ситуаций произведем ранжирование и определение значимых ситуаций.

Наиболее значимые сценарии развития аварийной ситуации при разгерметизации вагона-цистерны представлены ниже.

1. Авария первого уровня опасности – при $P_2 = 1,05 \cdot 10^{-5}$. Частичная разгерметизация вагона-цистерны вследствие образования свища на устройстве слива, арматуре. Последующее истечение нефтепродукта без мгновенного воспламенения. Образование пролива и его ликвидация.

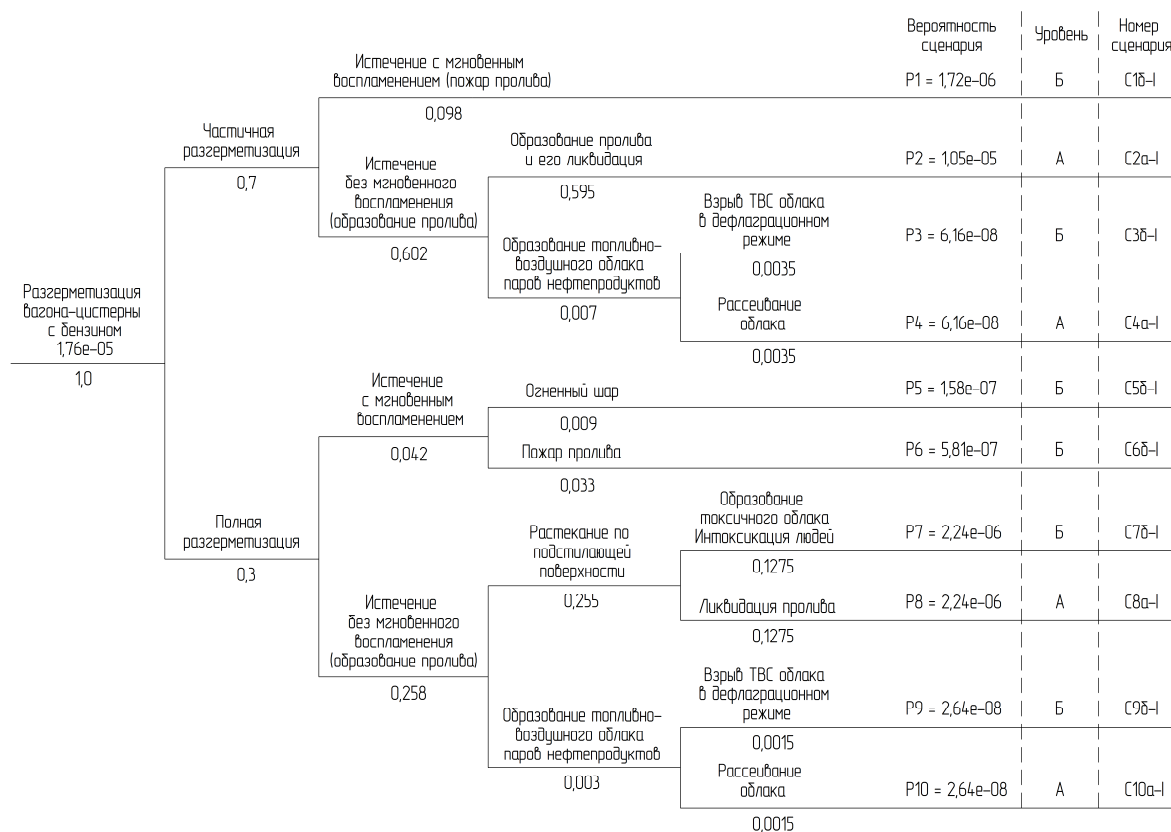


Рис. 5. «Дерево событий» развития аварийной ситуации

2. Авария второго уровня опасности – при $P_7 = 2,24 \cdot 10^{-6}$. Полная разгерметизация вагона-цистерны. Последующее растекание нефтепродукта без мгновенного воспламенения. Образование топливно-воздушных смесей.

3. Наиболее опасный сценарий – при $P_5 = 1,58 \cdot 10^{-7}$. Полная разгерметизация вагона-цистерны. Последующее растекание нефтепродукта. Образование топливно-воздушного облака. Взрыв ТВС, воздействие ударной волны на объекты и людей. Пожар пролива, воздействие теплового излучения на объекты станции, разрушение оборудования, травмирование людей. Возникновение вторичных поражающих факторов.

Аналогичным образом выполнены построения для остальных технологических блоков рассматриваемого объекта.

Таким образом, для объекта нефтепродуктообеспечения выполнено построение «дерева отказов», позволяющее в явном виде выявить слабые места системы. Определена величина риска возникновения отказа технической системы $P_A = 4,90 \cdot 10^{-4}$. На основании типовых сценариев развития аварии с нефтепродуктами для основных технологических блоков рассматриваемого объекта построены «дерева событий» с последующей оценкой вероятности их реализации и ранжированием. Выделены наиболее вероятные сценарии аварий уровня А и Б, а также наиболее опасные.

Риски развития аварий определенным образом связаны с вероятностью и ущербом для персонала, населения прилегающих территорий, объектов транспортной инфраструктуры и объектов окружающей природной среды [9–11].

Последующие исследования будут направлены на характеристику и количественную оценку основных причин, влияющих на обеспечение безопасности персонала и критически важных объектов транспортной инфраструктуры, а именно:

- 1) неполное знание сектора эксплуатационных нагрузок и механизмов достижения предельных состояний;
- 2) неполный учет изменений физико-механических свойств конструкционных материалов в процессе эксплуатации;
- 3) влияние ошибок операторов и персонала (в том числе ошибок проектирования, нарушение технологий строительства, эксплуатации и ремонта), т. е. человеческого фактора;
- 4) несанкционированное воздействие на объект со стороны третьих лиц по различным причинам;
- 5) прочие трудноформализуемые факторы.

Полученные сведения служат основанием для проведения дальнейших расчетов по прогнозированию чрезвычайных ситуаций на объекте, а также определению количественной оценки риска для обслуживающего персонала.

Библиографический список

1. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А. Ф. Шароварников, В. П. Молчанов, С. С. Воевода, С. А. Шароварников. М. : Калан, 2007. 380 с.
2. Федосов А. В., Маннанова Г. Р., Шпилова Ю. А. Анализ опасностей, оценка риска аварий на опасных производственных объектах и рекомендации по выбору методов анализа риска // Нефтегазовое дело : электрон. науч. журнал. 2016. № 3. С. 322–336. URL: <https://goo.gl/Fj4s79> (дата обращения: 01.02.2018).
3. Актуальные проблемы обеспечения устойчивости к возникновению и развитию пожара технологий хранения нефти и нефтепродуктов : тематический обзор. М. : ЦНИИТЭНефтехим, 2008. 68 с.
4. Техника и технологии локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов : справ. / И. А. Мерициди, В. Н. Ивановский, А. Н. Прохоров и др. ; под ред. И. А. Мерициди. СПб. : НПО «Профессионал», 2008. 819 с.
5. Султанов Р. М., Ибатуллина Л. А. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций при транспортировке нефтепродуктов железнодорожным транспортом // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. № 1 (107). С. 176–185.
6. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности / В. С. Сафонов [и др.]. М. : НУМЦ Минприроды России, 1996. 207 с.
7. Котякова В. А., Иоффе А. М. Применение метода анализа рисков безопасности функционирования технически сложных систем с использованием «дерева отказов» // Современные информационные технологии. 2013. № 17. С. 168–173.

8. Яковлев В. В., Едемская А. В. Расчет уменьшения рисков аварий на железнодорожном транспорте при перевозке нефтепродуктов и сжиженных газов // Неделя науки СПбПУ : материалы науч.-практ. конф. СПб., 2015. С. 150–154.

9. Артемов В. И. Комплексный подход к расчету рисков при моделировании аварий на железнодорожном транспорте // Транспорт: наука, техника, управление. 2009. № 2. С. 11–16.

10. Тарасова М. Н., Хамидуллина Е. А. Моделирование параметров риска аварии с выбросом опасных веществ при их перевозке железнодорожным транспортом // Техносферная безопасность в XXI веке : сб. науч. тр. магистрантов, аспирантов и молодых ученых VI Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2016. С. 110–117.

11. Медведев В. И., Ощепков З. П. Исследование проблем состояния пожарной безопасности сотрудников и студентов СГУПС // Современные проблемы технических наук : сб. докл. МНСК «Интеллектуальный потенциал Сибири». Новосибирск, 2015. С. 26–27.

V. I. Medvedev, Z. P. Oschepkov, M. G. Rublev

Security Analysis of Critical Railway Transport Facilities and Ensuring Personnel Safety

Abstract. The objects carry a high potential danger because of thermal and kinetic energy reserves of hydrocarbons concentrated in them. Violation of such facilities safe operation has often led, both in our country and abroad, to man – made disasters-fires and explosions, including those accompanied by an explosion wave, with significant damage. The statistical analysis of emergency situation circumstances at the enterprises of oil supply is carried out and groups causing them are defined.

On the basis of typical accident scenarios with oil products for the main technological blocks of the object under consideration, "trees of events" are constructed, which allow clearly identify weaknesses of the protection system, with the subsequent assessment of the probability of their implementation and ranking. A method is presented for the risk analysis of accidents at hazardous production facilities.

The results of the calculations showed that such elements of critical transport facilities as tanks and tank wagons, despite the efforts made by the owner company and the state, have an increased risk, so it is necessary to develop and implement additional measures: technical, technological, organizational and personnel. The obtained data serve as the basis for further calculations on forecasting potential emergencies at the facility, as well as determining the quantitative value of the risk for the staff.

Key words: *risk analysis; personnel safety; railway transport; critical facilities; reliability; transport infrastructure facilities; risk assessment; emergencies.*

Медведев Владимир Ильич – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» СГУПС. E-mail: medvedevvi2017@yandex.ru

Ощепков Захар Петрович – ведущий инженер службы охраны труда, промышленной безопасности и экологического контроля Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры; магистрант кафедры безопасности труда Новосибирского государственного технического университета. E-mail: osch94@mail.ru

Рублев Максим Григорьевич – кандидат биологических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» СГУПС. E-mail: rumag@ngs.ru