РАЗДЕЛ XIV. ПРОМЫШЛЕННАЯ И ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Алешков А.А., Цветков Г.А.

Современные проблемы обеспечения физической безопасности магистральных трубопроводов

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет
(Россия, Пермь)*

doi: 10.18411/lj-02-2021-66

idsp: ljjournal-02-2021-66

Аннотация

В данной статье рассматривается методология обеспечения физической безопасности магистральных трубопроводов, основанная на оценке совокупного влияния всех опасностей, имеющих место при эксплуатации объектов системы трубопроводного транспорта. Проанализирована статистика аварий на трубопроводах в различных регионах мира.

В общих чертах описывается концепция основных направлений и методов защиты объектов топливно-энергетического комплекса от антропогенных вмешательств. Показана необходимость в создании комплексной информационно - измерительной системы безопасности для решения задач защиты и обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводов.

Ключевые слова: трубопроводы, анализ статистических данных, аварийность, безопасность, физическая защита, средства охраны.

Abstract

This article discusses the methodology for ensuring the physical safety of main pipelines, based on the assessment of the cumulative impact of all the hazards that occur during the operation of facilities of the pipeline transport system. The statistics of pipeline accidents in various regions of the world are analyzed.

In general terms, the concept of the main directions and methods of protecting objects of the fuel and energy complex from anthropogenic interference is described. The necessity of creating an integrated information and measuring safety system for solving problems of protection and ensuring the safe operation of pipelines is shown.

Keywords: pipelines, statistical data analysis, accident rate, safety, physical protection, means of protection.

Система магистральных трубопроводов является важным звеном топливно-энергетического комплекса России и мировой энергетики в целом, от бесперебойной, безаварийной и оперативной работы которого в значительной степени зависит экономическая, экологическая и промышленная безопасность. Поэтому к магистральным трубопроводам предъявляются особые требования безопасности и надежности, ужесточающиеся из года в год вследствие постоянного роста их протяженности и непрерывного старения.

Основной угрозой защищенности и бесперебойной работы трубопроводов и причиной возникновения большинства опасных производственных факторов, возникающих при эксплуатации данных объектов, являются внезапные разливы или истечения продукта (утечки) из-за нарушения герметичности трубопровода. Эти негативные воздействия могут носить серьезный характер, начиная с непредвиденных остановок перекачки до непоправимого ущерба окружающей среде, имущественного ущерба, значительных финансовых затрат, травм и гибели людей [1].

В последние годы наблюдается положительная тенденция снижения количества аварий на трубопроводном транспорте во всем мире (рис.1). Так, количество аварий на газопроводах Европы снизилось в 5-8 раз по сравнению с семидесятыми годами, а в России произошло пятикратное снижение аварийности за последние 20 лет. Показатель интенсивности аварий на магистральных трубопроводах как России, так и Европы стабилизировался на отметках 0,1-0,2 аварий в год на 1000 км длины, а США – 0,6. Исключением являются нефтепроводы Европы, где с 2011 года резко увеличилось число аварий, связанных с кражей перекачиваемого продукта, и в настоящий момент показатель интенсивности аварий составляет 0,4 аварий в год на 1000 км длины [2, 3, 4, 5, 6].

Снижение аварийности на МТ можно объяснить завершением периода вработываемости оборудования, совершенствованием технологий строительства и эксплуатации трубопроводов, использованием уже накопленных знаний о происшедших ранее авариях. Процессы износа материала трубопроводов (в т.ч. коррозия) достаточно долгосрочны и на современных МТ контролируются развитыми диагностическими процедурами. Более существенный вклад в причины аварийности на данном этапе эксплуатации МТ вносят не внутренние технологические причины (изменений в технологии и обслуживании не наблюдается), а нерасчетные внешние природные и антропогенные воздействия (рис.2 и 3).

Рисунок 1 – Удельная интенсивность аварий на магистральных трубопроводах, осредненная по пятилетним периодам

Основными причинами аварий на магистральных газопроводах в Европе и США являются коррозия (25%), дефекты материалов и СМР (20-30%) и внешние воздействия (25-35%). Для магистральных газопроводов России характерны аварии, вызванные коррозией труб, – 58%, дефектами оборудования – 23% и внешними воздействиями – 16%. Для нефтепроводов России и Европы в последнее десятилетие основной причиной аварий является внешнее воздействие – 60% случаев, в то время как в США оно составляет лишь 22% [2, 3, 4, 5, 6].

То есть наряду с традиционными причинами аварийных ситуаций, такими как коррозия, износ, ошибки персонала, воздействия природного характера, в настоящее время существенную роль стали играть внешние воздействия (деятельность третьих лиц): врезки с целью хищения перекачиваемого продукта, террористические акты и диверсии, случайные повреждения трубопроводов техникой и т.д.

Рисунок 2 – Распределение числа аварий на магистральных нефтепроводах в зависимости от причин их возникновения за 2010-2018 гг.: а) Зап. Европа б) Россия в) США

В России наиболее остро стоит проблема обнаружения криминальных врезок в трубопроводы и предотвращения хищений транспортируемого продукта. Она является одной из самых актуальных и сложных проблем эксплуатации объектов трубопроводного транспорта России [7]. Ущерб, наносимый предприятиям, оценивается сотнями миллионов долларов, в то время как эффективность противодействия этому явлению недостаточна [8]. Так, по данным ПАО «Транснефть», в период с 2003 по 2017 г. на объектах компании было выявлено 5 тыс. 733 несанкционированных подключений (рис. 4), что составляет около 70 % от всех преступных посягательств на объекты компании [9].

Рисунок 3 – Распределение числа аварий на магистральных газопроводах в зависимости от причин их возникновения за 2010-2018 гг.: а) Зап. Европа б) США в) Великобритания г) Россия

Рисунок 4 – Количество совершенных криминальных врезок в магистральные нефтепроводы и нефтепродуктопроводы за 2003-2017 года («Транснефть»)

Таким образом, статистические данные показывают, что в современных условиях эксплуатации магистральных трубопроводов значительная часть утечек и повреждений были вызваны внешними (искусственными) воздействиями со стороны человека, что свидетельствует о наличии проблем в области защиты трубопроводов от антропогенного вмешательства.

На данный момент вопрос защиты объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в целом и трубопроводного транспорта в частности стоит на повестке дня. Вопросы обеспечения безопасности и антитеррористической защищённости объектов (ТЭК) в России регламентирует ФЗ «О безопасности объектов ТЭК» и Постановление Правительства РФ № 458 «Об утверждении правил по обеспечению безопасности и антитеррористической защищенности объектов топливно-энергетического комплекса». В обязательные мероприятия по защите и профилактике от нападений включены категорирование объектов и разработка паспорта безопасности [10].

В зависимости от категории опасности объекта предусмотрено построение физической защиты объектов, включая организацию охраны (в том числе использование мобильных групп реагирования и стрелкового оружия), обеспечение пропускного и внутриобъектового режимов, а также использование инженерно-технических средств охраны (системы сигнализации, доступа, досмотра, видеонаблюдения, ограждения и т.д.).

Для обеспечения безопасности протяженных промышленных объектов, таких как трубопроводы, применяются системы безопасности, в состав которых входят технические средства обнаружения (ТСО) нарушителей различного типа действия: оптоволоконные датчики, спутниковые системы, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), сейсмические и ультразвуковые датчики, электрооптические датчики и др. [11]. Кроме того, для целей обнаружения вмешательств третьих лиц в работу МТ применяются системы мониторинга технического состояния трубопровода: балансовый метод, параметрические методы, методы внутритрубной инспекции и т.д.

[12]. Помимо прочего, на данных объектах обязательна система защиты информации от неправомерных посягательств [10]. Краткий перечень основных направлений и методов защиты объектов ТЭК представлен на рис. 5, более подробная классификация методов обнаружения утечек и несанкционированных врезок по различным признакам – на рис. 6.

Рисунок 5 – Основные направления и методы защиты объектов ТЭК

Наиболее распространенным, относительно экономичным и простым (а на некоторых объектах и основным) методом охраны и защиты несомненно является применение сил ведомственной охраны. Однако деятельность охранных подразделений не всегда позволяет эффективно выявлять вмешательства третьих лиц и оперативно реагировать на их устранение. Это обусловлено климатическими и географическими особенностями, а также огромной протяженностью трубопроводов.

Рисунок 6 – Классификация методов обнаружения утечек и несанкционированных врезок

Применение инженерно-технических средств охраны для обеспечения безопасности объектов трубопроводного транспорта отличается высокой стоимостью и зачастую низкой эффективностью (особенно для прикрытия подступов к охраняемым объектам). А существующие системы (методы) мониторинга трубопроводов не удовлетворяют всем критериям, предъявляемым к современным методам обнаружения несанкционированных врезок и других вмешательств. Одни из методов не позволяют определить местоположение воздействия или утечки, другие имеют низкую чувствительность, третьи – сложны в реализации, требуют больших затрат и не слишком универсальны, четвертые не позволяют обнаружить и предотвратить повреждение трубопровода [12]. Краткое описание наиболее распространенных ТСО с указанием их преимуществ и недостатков рассмотрено в таблице 1.

Таблица 1

Основные технические средства обнаружения нарушителей

1. Волоконно-оптические средства	
Метод основан на размещении рядом с трубопроводом (по периметру охраняемого объекта) или непосредственно на объекте датчиков в виде мультисенсорных кабелей или точечных сенсоров. Они позволяют непрерывно регистрировать изменения распределения температуры (технология DTS) и механических напряжений (технология DVS) в окружающей трубопровод среде (деформации, вибрации и другие механические воздействия).	Описание

Высокая чувствительность и точность локализации вторжения, невосприимчивость к электромагнитным излучениям, электробезопасность, способность работать в самых агрессивных средах, низкая стоимость, минимальные требования к обслуживанию – высокая экономическая эффективность.	Преимущества (+)
Низкая помехоустойчивость, высокая частота ложных срабатываний, очевидность расположения, возможность «насыщения» (датчики не могут идентифицировать множество одновременных воздействий), невозможность применения в сложных инженерно-геологических условиях (горная местность, районы с распространением вечномёрзлых грунтов и т.д.), недостаточность получаемой информации для идентификации события.	Недостатки (-)
2. Акустические и сейсмические средства	
Акустические средства основаны на регистрации и оценке акустических шумов, возникающих при истечении перекачиваемого продукта через отверстие в стенке трубы вследствие вибрации и кавитации, а также при деформации напряжённого материала (работа землеройной техники и другие внешние воздействия). Сейсмические – реагируют на колебания или деформации контактирующей с ними среды, вызванные перемещением людей или других объектов.	Описание
Высокая чувствительность (способны обнаруживать небольшие утечки) информативность, скрытность. Не требуют больших капиталовложений и энергозатрат, применимы для любых конструкций трубопроводов, безопасны с экологической точки зрения. Существует возможность слежения за нарушителем на основе использования методов пеленгации с помощью сейсмолокаторов.	+
Низкая помехозащищённость на фоне различных помех метеорологического, биологического и техногенного характера, высокое влияние окружающей среды: свойств грунта, воздуха и т.д.	-
3. Электрооптические средства	
Применение сети видеокamer или других оптических датчиков (телевизоров, датчиков движения и т.п.) для фиксирования несанкционированных действий, либо подготовки к ним.	Описание
Возможность анализа действий злоумышленников, контроль действительно тревожных ситуаций, различные условия детекции для самого объекта и зоны отчуждения. Позволяют обнаружить, распознать и идентифицировать нарушителей и события.	+
Возможность мониторинга только отдельно взятого участка объекта и сложность контроля протяженных конструкций, низкая защищённость. Высокое влияние окружающей среды.	-
4. Аэрокосмический мониторинг	
Используемый в настоящее время метод спутникового мониторинга трубопроводов основан на глобальной системе позиционирования (GPS). Позволяет получать космические снимки интересующего объекта (в видимом и инфракрасном диапазоне, радиодиапазоне).	Описание
Возможность мониторинга больших территорий независимо от инженерно-геологических условий, оперативность получения информации. Доступность данных (космические снимки находятся в свободном доступе).	+
Высокая стоимость (крупные вложения). Недостаточная точность изображений.	-
5. Параметрические средства	
Основаны на использовании данных о параметрах перекачиваемого продукта, предоставляемых системой диспетчерского контроля и сбора данных (SCADA), и их обработки с помощью различных математических моделей (в настоящее время перспективно применение нейронных сетей). К ним относят балансовый метод, метод анализа линии гидравлического уклона, метод расход-давление и т.д.	Описание
Простая реализация, низкая стоимость и возможность использования для постоянного контроля стандартных контрольно-измерительных приборов (КИП).	+
Низкая точность, высокая частота ложных срабатываний, неточность математической модели, затруднённость применения при переходных (нестационарных) режимах. Не позволяют обеспечить раннее обнаружения нарушителей и идентифицировать причину срабатывания (тревожного сигнала).	-

Кроме того, инженерно-технические средства охраны, применяемые в настоящее время с целью обеспечения безопасности на объектах ТЭК, характеризуются [13]:

- большими массогабаритными характеристиками (вследствие устаревшей элементной базы);
- отсутствием «интеллектуальности», заключающейся в невозможности классификации и распознавания обнаруженных целей;
- невозможностью обеспечить раннее детектирование вторжения на территорию объекта.

В связи этим продолжается поиск наиболее эффективной, экономичной и надежной конфигурации и структуры системы физической защиты (СФЗ). Некоторые общие пути повышения эффективности функционирования СФЗ в современных условиях представлены в таблице 2 [11, 12, 14].

Важным вопросом в построении эффективной СФЗ трубопроводов является разработка модели количественной оценки рисков в трубопроводном транспорте, которая могла бы использоваться в автоматизированной системе принятия решений, а также для прогнозирования аварий и инцидентов, определения превентивных и смягчающих мер. Из анализа литературы очевидно, что в настоящее время точность является основной проблемой в оценке риска аварий на трубопроводах [11].

Таблица 2

Пути повышения эффективности функционирования СФЗ объектов ТЭК

1. Общеметодологические	2. Организационные	3. Технические
1.1 Разработка общей математической модели функционирования СФЗ	2.1 Измерение структуры и параметров элементов СФЗ	3.1. Разработка перспективных средств и методов обнаружения и идентификации нарушителей
1.2 Разработка модели количественной оценки рисков в трубопроводном транспорте	2.2 Совершенствование организации и способов получения информации о местах возможного появления нарушителей в пределах контролируемых участков	3.2 Разработка, внедрение и совершенствование мобильных средств раннего обнаружения
1.3 Исследование состояния, определение направлений и научно-технический прогноз развития систем охраны	2.3 Размещение на местности к охраняемому объекту рубежей, прикрываемых средств раннего обнаружения	3.3 Разработка и внедрение аппаратных и программно-методических комплексов анализа данных
1.4 Обоснование требований к СФЗ и тактико-технических требований к средствам раннего обнаружения (СРО) в современных условиях	2.4 Совершенствование подготовки специалистов, эксплуатирующих СФЗ	3.4 Разработка и создание автоматизированных систем охраны на основе системы поддержки принятия решения

Для выработки наилучшей стратегии защиты и последующей оценки защищенности объекта необходима общая математическая модель функционирования системы физической защиты. В настоящее время не существует единых подходов к решению данной проблемы, на что указывает достаточное количество публикаций [15, 16 и др.].

Актуальной задачей также является внедрение в СФЗ специального программного обеспечения для автоматизированной обработки данных (например, основанного на нейронных сетях), которое позволяло бы осуществлять сбор, передачу, хранение и обработку данных (аналитические расчеты, оценка технического состояния трубопровода, принятие решений, прогнозирование аварий и инцидентов, определение и классификация различных угроз в реальном времени).

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что на данном этапе развития технологии и науки необходимо переходить к созданию комплексной

информационно - измерительной системы безопасности, разработанной исключительно для задач защиты и обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводов, которая будет обеспечивать:

- ✓ возможность раннего обнаружения нарушителя – еще до его проникновения в охранную зону;
- ✓ распознавание и идентификацию нарушителей в автоматическом режиме;
- ✓ продолжительную автономную работу системы;
- ✓ прогнозирование аварий и инцидентов, оценку рисков и предварительное принятие решений без участия оператора;
- ✓ точное следование контурам охранной зоны, отсутствие "мертвых" зон;
- ✓ по возможности скрытую установку датчиков системы;
- ✓ независимость параметров системы от сезона и погодных условий;
- ✓ возможность работы в сложных гидрогеологических и климатических условиях, в том числе в морских и условиях Крайнего Севера;
- ✓ невосприимчивость к внешним факторам "нетревожного" характера – индустриальные помехи, шум транспорта, мелкие животные и птицы;
- ✓ устойчивость к электромагнитным помехам – грозовые разряды, источники мощных электромагнитных излучений и т.п.;
- ✓ высокую степень интеграции и взаимодействия с системами мониторинга технического состояния трубопровода.

Структура такой системы может выглядеть следующим образом:

1. Автоматические системы постоянного контроля с функцией охраны и раннего обнаружения несанкционированного доступа к трубопроводам, позволяющие оперативно обнаруживать факт утечки и устанавливать место ее образования. Такие системы значительно сокращают время реакции аварийных служб и уменьшают экологический ущерб от разлива перекачиваемой жидкости, а также позволяют свести к минимуму время вынужденного прекращения перекачки и значительно сократить число криминальных врезок.

2. Периодический мониторинг с помощью аэровизуального обследования, геологического обследования, дистанционного зондирования с применением космосъемки, аэрофотосъемки, лазерного сканирования и т.д.

3. Автоматизированная система обработки данных – совокупность технических средств и программного обеспечения по автоматическому сбору, передаче, хранению и обработке данных (аналитические расчеты, оценка технического состояния трубопровода, принятие решений).

Основной недостаток подобной системы – очень высокая стоимость внедрения и обслуживания, кроме того технические показатели современных ТСО все еще далеки от идеальных (точность определения координат источника сигналов, как правило, составляет не менее 30-50 м, не редки ложные срабатывания) [17].

Выводы:

1. На основании анализа статистических данных можно сделать вывод о том, что в настоящее время основной угрозой эффективной и безопасной транспортировки углеводородов по магистральным трубопроводам являются несанкционированные врезки и другие посторонние вмешательства в их работу, приводящие к загрязнению окружающей среды, причинению вреда здоровью работникам и самим нарушителям и материальными убытками, что придает особую важность вопросам прогнозирования и обнаружения такой деятельности в процессе эксплуатации трубопроводов.

2. Проведенный анализ традиционных и передовых мер безопасности, используемых для предотвращения и смягчения последствий преднамеренных воздействий на трубопроводы, свидетельствует о их несовершенстве и наличии

большого количества проблемных вопросов, которые еще только предстоит решить. Продолжается поиск наиболее эффективной, экономичной и надежной конфигурации и структуры системы физической защиты трубопроводов.

3. На сегодняшний день наиболее надежным способом предупреждения и обнаружения утечек и несанкционированных воздействий является использование комбинированной системы постоянного и периодического мониторинга технического состояния трубопровода, которая, однако, все же не лишена недостатков. Поэтому, актуальность создания новых методов и средств обнаружения утечек углеводородов из магистральных трубопроводов, а также совершенствование существующих, остается неизменно высокой.

1. Morgan Henrie, Philip Carpenter, R. Edward Nicholas. Pipeline Leak Detection Handbook. Elsevier Inc., 2016. - P. 324.
2. Годовые отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]: архив 2004-2018 гг. – Режим доступа: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 12.12.2020).
3. Gas Pipeline Incidents. 10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group [Электронный ресурс]. Doc. No EGIG 11.R.0402, March 2018. – Режим доступа: <http://www.egig.eu/reports> (дата обращения: 12.12.2020).
4. Pipeline Product Loss Incidents and Faults Report (1962 - 2017). Report of the UKOPA Fault Database Management Group [Электронный ресурс] – Ambergate UK, March 2019. – Режим доступа: <http://www.ukopa.co.uk/wp-content/uploads/2017/12/UKOPA-12-0046.pdf> (дата обращения: 12.12.2020).
5. Performance of European cross-country oil pipelines. Statistical summary of reported spillages in 2017 and since 1971 [Электронный ресурс]. Report No 3/19. – Brussels: CONCAWE, June 2019. – Режим доступа: <https://www.concawe.eu/content/> (дата обращения: 12.12.2020).
6. PHMSA Pipeline Incidents and Mileage Reports [Электронный ресурс]: база данных. – Режим доступа: <http://primis.phmsa.dot.gov/comm/reports/safety/> (дата обращения: 12.12.2020).
7. В.А. Комаров, З.В. Семенова, Д.А. Бронников, А.А. Нигрей // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело – 2019. – № 1 (19). – С. 87–100.
8. Н.В. Глушенко, Р.А. Шестаков Д.Н. Комаров. Организационно-правовые и технические аспекты обнаружения утечек нефти в магистральных трубопроводах // Транспорт и 34 хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья – 2015. – № 2. – С. 34–39.
9. Годовые отчеты – ПАО «Транснефть» [Электронный ресурс]: архив 2007-2018 гг. – Режим доступа: <https://www.transneft.ru/investors/219>.
10. Об утверждении Правил по обеспечению безопасности и антитеррористической защищенности объектов топливно-энергетического комплекса [Электронный ресурс]: Постановление правительства РФ от 05.05.2012 №458 // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2020.
11. Johnson eze. Integrated oil and gas pipeline monitoring and incident mitigation system (iopmims) framework. Thesis on the search. ac. deg. cand. of tech. Sci. University of Wolverhampton, 2017. - 327 p.
12. Алешков А.А. Современные подходы к обнаружению утечек и несанкционированных врезок на магистральных трубопроводах // Материалы 17-й Международной научно-практической конференции по проблемам экологии и безопасности. – 2019. – № 17. – С. 160–165.
13. Щетинин, А. В. Информационно - измерительные системы периметрального контроля охраняемых объектов на основе вибрационных датчиков [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.11.16 / Щетинин, Андрей Владимирович. – Тула, 2011. – 239 с.
14. Бондарчук А.С. Система охраны и обороны важных государственных объектов и оценка эффективности её функционирования. Монография. Под.ред. В.П. Герасимени. – Пермь: ПВИ ВВ МВД России, 2011. – 190 с.
15. Панин О. А. Анализ безопасности интегрированных систем защиты: логико-вероятностный подход // Специальная техника. – 2004. – № 5. – С. 23–27.
16. Радаев Н. Приближенные оценки защищенности объектов от террористических действий // БДИ. – 2007. – № 3. – С. 28–32.
17. Н.В. Акимова. Дистанционное обнаружение течей в трубопроводах // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2009. – 2(1). – С. 137-142.