

УДК 622.276:622.692.4.053:331.45

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2019

## О СТРУКТУРЕ СИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ УГРОЗ

В.А. Комаров, З.В. Семенова<sup>1</sup>, Д.А. Бронников, А.А. Нигрей

Омский государственный университет путей сообщения (644046, Россия, г. Омск, пр. Маркса, 35)

<sup>1</sup>Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5)

## ABOUT THE STRUCTURE OF THE SYSTEM OF PHYSICAL PROTECTION OF MAIN PIPELINES AGAINST INTENDED THREATS

Vladimir A. Komarov, Zinaida V. Semenova<sup>1</sup>, Dmitrii A. Bronnikov, Aleksei A. Nigrei

Omsk State Transport University (35, Marks ave., Omsk, 644046, Russian Federation)

<sup>1</sup>The Siberian State Automobile And Highway University (5, Mira ave., Omsk, 644080, Russian Federation)

Получена / Received: 10.09.2018. Принята / Accepted: 14.01.2019. Опубликовано / Published: 29.03.2019

### Ключевые слова:

магистральные трубопроводы, несанкционированные врезки, перекачиваемый продукт, чрезвычайные ситуации, методы обнаружения и предупреждения утечек продукта, распределенные волоконно-оптические системы, борьба с искусственными помехами, мультисенсорная система.

Статистика чрезвычайных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта свидетельствует о наличии проблемных вопросов при транспортировке перекачиваемых продуктов. В структуре аварий прошедшего десятилетия преобладали хищения этих продуктов («врезной терроризм»), зафиксированы диверсионные акты. В статье приведены данные о росте числа криминальных вмешательств в работу магистральных трубопроводов, представляющих огромную опасность для здоровья и жизни населения, угрозу окружающей среде, так как они являются причиной аварий, разливов нефти и нефтепродуктов, загрязнения почвы, рек и водоемов, а также сопутствующих экологических и экономических потерь. Проиллюстрированы суммарные потери, которые несет собственник трубопроводной системы от нападений злоумышленников. Чем меньше средств он вкладывает в обеспечение безопасности созданной инфраструктуры, тем больших потерь следует ожидать при ее эксплуатации.

Проведен анализ публикационной активности в области обеспечения безопасности трубопроводного транспорта и обнаружения несанкционированных действий в охранной зоне, который показал, что исследования в основном сконцентрированы на создании системы физической защиты магистральных трубопроводов, реализующей принцип «не пропустить контакта злоумышленника с оболочкой трубы». Основное направление исследований по противодействию указанным угрозам ориентировано на обнаружение возмущений сейсмического поля в охранной зоне трубопровода с помощью волоконно-оптического кабеля (датчика). Помимо распределенных оптоволоконных систем для превентивной нейтрализации террористических угроз протяженным объектам оценивались возможности видеовидеоаналитических и тепловизионных систем.

Предложена структура системы физической защиты магистральных трубопроводов для обнаружения и нейтрализации несанкционированных врезок в трубу в целях минимального уровня потерь при охране трубопровода.

Продемонстрирована эффективность предложенного подхода по определению требований к системам защиты объектов от террористических угроз.

### Key words:

main pipelines, unauthorized tie-ins, pumped product, emergency situations, methods for detecting and preventing product leaks, distributed fiber-optic systems, fighting artificial interference, multi-sensor system.

The statistics of emergency situations at pipeline transportation facilities indicates the presence of problematic issues during transportation of products. In the structure of accidents of the past decade, theft of products (“mortise terrorism”) prevailed, sabotage acts were recorded. The article presents data about the growth in the number of criminal interventions in the operation of pipelines, which pose a great danger to the health and life of the population, a threat to the environment, as they cause accidents, spills of oil and oil products, pollution of soil, rivers and water bodies, as well as associated environmental and economic losses from these criminal interventions. The total losses incurred by the owner of the pipeline system from the attacks of intruders are illustrated. The less the owner invests in ensuring the safety of the infrastructure, the greater losses should be expected during the operations.

The analysis of publication activity in the field of ensuring pipeline safety and the detection of unauthorized actions in the protection zone was carried out, which showed that the research is mainly focused on creating a system of physical protection of pipelines that implements the principle of “do not miss the attacker’s contact with the shell of the pipe”. The main direction of research to counter these threats is focused on the detection of the seismic field disturbances in the security zone of the pipeline using a fiber-optic cable (sensor). In addition to distributed fiber optic systems for the preventive neutralization of terrorist threats to extended objects, the capabilities of video-analytical and thermal imaging systems were evaluated.

The structure of the pipelines physical protection system for the detection and neutralization of unauthorized tie-ins into the pipe in order to minimize the level of losses during pipeline security is proposed.

The effectiveness of the proposed approach to determining the requirements for systems to protect objects from terrorist threats is demonstrated.

Комаров Владимир Александрович – аспирант кафедры информационной безопасности (тел.: +007 913 631 00 57, e-mail: reallkom@gmail.com).

Семенова Зинаида Васильевна – доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности (тел.: +007 913 615 97 58, e-mail: zvs111@gmail.com).

Бронников Дмитрий Алексеевич – аспирант кафедры информационной безопасности (тел.: +007 929 365 85 37, e-mail: dmi-bronnikov@vandex.ru).

Нигрей Алексей Андреевич – аспирант кафедры информационной безопасности (тел.: +007 913 638 50 02, e-mail: nigrey.n@mail.ru). Контактное лицо для переписки.

Vladimir A. Komarov (Author ID in Scopus: 57197211324) – PhD student of the Department of Information Security (e-mail: reallkom@gmail.com).

Zinaida V. Semenova – Doctor of Education, Professor, Head of the Department of Information Security (e-mail: zvs111@gmail.com).

Dmitrii A. Bronnikov (Author ID in Scopus: 57200729064) – PhD student of the Department of Information Security (e-mail: dmi-bronnikov@vandex.ru).

Aleksei A. Nigrei (Author ID in Scopus: 57200720879) – PhD student of the Department of Information Security (e-mail: nigrey.n@mail.ru). The contact person for correspondence.

## Введение

Трубопроводный транспорт – один из самых безопасных, надежных, эффективных экономичных методов непрерывной транспортировки неограниченного потока перекачиваемых продуктов на большие расстояния независимо от погоды. Общая протяженность трубопроводов России на 2018 г. составляет около 285 тыс. км. Однако статистика чрезвычайных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта свидетельствует о наличии проблемных вопросов при транспортировке нефти, нефтепродуктов, газа. По мере старения трубопроводы начинают выходить из строя, появляются утечки. Наряду с традиционными причинами аварийных ситуаций: коррозия, природные воздействия, ошибки персонала – существенную роль стали играть внешние воздействия (таблица) [1].

### Информация о причинах аварий на магистральных продуктопроводах различных регионов мира

Страна (регион)	Причины аварий на магистральных нефтепроводах (газопроводах)											
	внешние воздействия		дефекты оборудования		коррозия		природные воздействия		ошибки персонала		другие	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Россия	63	17	19	30	6	50	–	–	12	3	–	–
США	23	25	20	19	23	23	4	10	7	2	23	21
Западная Европа	37	50	25	16	28	15	3	7	7	5	–	7

Есть и другие причины, приводящие к появлению утечек, – случайное повреждение трубопровода, террористические акты, диверсии, несанкционированные врезки с целью хищения продукта и т.д. По статистике примерно 63 % всех случаев составляет утечка, возникающая из подземных газопроводов, 27 % – это повреждения наземной части магистрального трубопровода, 10 % – случаи разрывов подводных труб.

Одной из самых актуальных и сложных проблем эксплуатации магистральных трубопроводов является обнаружение несанкционированных врезок и

предотвращение хищений нефти из трубопроводов [2]. Одна из основных причин аварий на нефтепроводах России – несанкционированные врезки и диверсии (69,1 %), в результате которых происходит разлив нефти, нарушается герметичность трубопроводов, что приводит к сокращению их срока службы, наносится значительный экономический ущерб, создаются предпосылки к возникновению экологических катастроф [3].

За последние 10 лет на территории России выявлено почти 4 тыс. несанкционированных врезок, что составляет 70 % всех преступлений, связанных с хищением нефти и продуктов ее переработки. Так, по предварительной оценке, уже за январь–март 2018 года злоумышленниками похищено более 18,5 тыс. т нефти на сумму свыше 400 млн руб.

График количества совершенных незаконных врезок в магистральные трубопроводы на территории России (2012–2017 гг.) показан на рис. 1 [4].



Рис. 1. Динамика незаконных врезок в магистральные трубопроводы России за период с 2012 по 2017 г.

Криминальные вмешательства в работу магистральных трубопроводов представляют огромную опасность для здоровья и жизни населения и угрозу окружающей среде, так как являются причиной аварий, разливов нефти и нефтепродуктов, загрязнения почвы, рек и водоемов [5]. Самыми опасными по последствиям являются разрывы магистральных газопроводов, поскольку они могут стать причиной отключения газового снабжения целых регионов. При этом даже после полного отключения объекта газоснабжения существует риск возникновения опасных последствий в виде взрыва или утечки газа,

который может стать причиной загрязнения окружающей среды.

Аварии приводят к утечкам нефтепродуктов, газа из трубопроводов, что представляет серьезную опасность для людей, окружающей среды, наносит огромный экономический и экологический ущерб. Динамика экологического ущерба на магистральных трубопроводах России за период с 2012 по 2016 г. представлена на рис. 2 [6, 7].

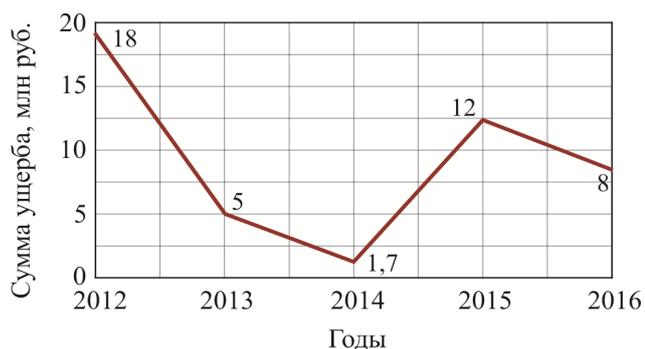


Рис. 2. Динамика экологического ущерба от аварий на магистральном трубопроводном транспорте России с 2012 по 2016 г.

В последние годы показатель интенсивности аварий на магистральных трубопроводах как России, так и США стабилизировался на отметке 0,1 аварии в год на 1000 км для газопроводов и около 0,1–0,4 аварии в год на 1000 км для нефти и нефтепродуктопроводов. Пресс-секретарь Гринпис России в своей публикации (февраль 2018) указал, что ежегодно в России разливается более 10 миллионов баррелей нефти. Это в два раза больше, чем при катастрофе в Мексиканском заливе [8].

В XXI в. трубопроводный транспорт вошел изношенным на 50–70 %. По оценкам специалистов МЧС России, более 20 % магистральных трубопроводов и более 40 % промысловых нефтепроводов имеют возраст более 30 лет, хотя безаварийный период использования составляет 10–20 лет [9]. Все это приводит к тому, что Россия ежегодно теряет миллиарды долларов.

Главной причиной аварий на магистральных газопроводах в США является дефект оборудования (27 %) и

коррозия труб (24 %). Для магистральных газопроводов России характерны аварии, вызванные коррозией труб, – 49 %, дефектами оборудования – 32 %, для нефтепроводов в последнее десятилетие основной причиной аварий является внешнее воздействие – 60 % случаев, в то время как в США оно составляет лишь 20 % [10].

Авторы [11] провели анализ публикационной активности в области обеспечения безопасности трубопроводного транспорта и обнаружения несанкционированных действий в охранной зоне. Анализ показал, что исследования в основном сконцентрированы на создании системы физической защиты магистральных трубопроводов, реализующей принцип «не пропустить контакта злоумышленника с оболочкой трубы». Авторы [11] установили, что за последние несколько лет в международных базах данных представлено значительное количество публикаций по этой тематике: в базе данных Web of Science более 80 публикаций, в Scopus – более 60. Анализ публикаций базы данных РИНЦ за 5 лет (2012–2016) свидетельствует о том, что среди научных работников возобновился интерес к проблеме обеспечения безопасности трубопроводного транспорта и обнаружения несанкционированных врезок – более 90 работ.

Результаты исследований по обнаружению утечек продукта из нефте- и газопроводов обобщены в [12, 13]. Можно констатировать, что основной интерес зарубежных исследователей концентрируется на разработке сейсмических (57 %), оптических (23 %) и виброакустических (14 %) методов обнаружения и предупреждения утечек продукта. В разработке сейсмических методов основное внимание уделяется совершенствованию алгоритмов обработки сигналов (~ 58 %), анализу возможности различных сенсоров посвящено 27 % публикаций, остальные 15 % можно отнести к описанию объектов обнаружения и результатов испытаний предложенных систем.

Значительное внимание уделено применению волоконно-оптического кабеля в качестве датчика по измерению распределения температуры и механических напряжений в окружающей трубопровод среде. Локальные неоднородности этих показателей приводят к появлению составляющих комбинационного рассеяния, распространяющегося по кабелю оптического импульса (Рамана, Мандельштама – Бриллюэна и др.). По времени распространения этих компонент от места рассеяния (принцип активной радиолокации) судят о местоположении этих неоднородностей [14–16]. Волоконно-оптические датчики для нефтегазовой отрасли производятся компаниями Weatherford, Baker Hughes, Halliburton, Schlumberger, а также российскими предприятиями «Омега», «Оптолинк», «Интел-Системы». Изложенный принцип обнаружения внешних воздействий на окружающую трубопровод среду (механические напряжения) и утечек (локальные изменения температуры среды) положен в основу разработанной ОАО «АК «Транснефть»» системы обнаружения утечек и контроля активности (СОУиКА) «Омега», которая в режиме реального времени анализирует изменения температурного поля и обнаруживает утечки газа, нефти и других жидкостей также и в многофазных трубопроводах с точностью до 5 м [17]. Другая охранная волоконно-оптическая система аналогичного назначения «Дунай», прошедшая многочисленные полевые испытания на объектах ООО «Газпром», позволяет регистрировать перемещение пешехода и ручную копку непосредственно над кабелем [18]. При приближении человека, автомобиля или при проведении работ вблизи охраняемого объекта система фиксирует и передает информацию о приближении к охраняемому объекту с точностью до 10 метров на компьютер оператора. По результатам испытаний зарубежных разработок, используемых для обнаружения террористических атак на

протяженные объекты, можно сделать вывод, что все вопросы, связанные с возможностью решения рассматриваемой проблемы, сняты с повестки дня [15, 19]. Однако продолжает сохраняться неясность с эффективностью работы указанных систем в присутствии шумов естественного и искусственного происхождения. Данное обстоятельство, видимо, учитывалось авторами последних публикаций, пришедших к следующим заключениям:

– «В открытой печати не найдено достоверных данных об удовлетворительной работе подобных систем на протяженных (свыше 10 км) объектах» [18];

– «Для дальнейшего совершенствования метода необходимы проведение научно-исследовательских работ, <...> а также разработка методики обработки данных» [20];

– «Волоконно-оптические методы обнаружения утечек в трубопроводах <...> требуют серьезных доработок. <...> В сложных сейсмоактивных условиях возникает необходимость вкупе применения с тепловым и вибрационным методами ...» [21].

### Шумовой фактор

Признаком террористической атаки является вторжение нарушителя в охранную зону и формирование шурфа для контакта с оболочкой трубы. В месте деформации почвогрунта формируются сейсмические колебания, которые при достижении волоконно-оптического кабеля вызывают его деформацию. В верхнем слое почвы скорость продольных волн и коэффициент поглощения пропорциональны примерно корню квадратному от частоты колебаний. В зависимости от водонасыщенности, пористости и т.д. грунта скорость этих волн может различаться более чем в 10 раз. В силу указанных причин форма регистрируемых возмущений может заметно изменяться в течение суток. Данное обстоятельство затрудняет применение оптимальных методов обнаружения этих возмущений на фоне шумов.

Амплитуды естественных сейсмических шумов находятся на уровне 1 мкм [22] и соизмеримы с амплитудой сигналов, подлежащих обнаружению (рис. 3).

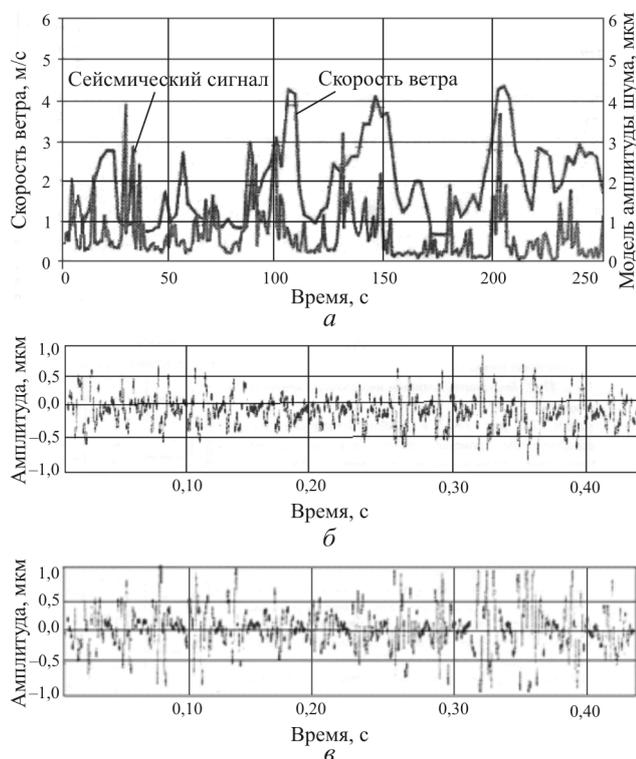


Рис. 3. Регистрограммы скорости ветра и модуля сейсмического шума на открытой местности (высота травы 0,2 м) на расстоянии 7 м от лесополосы (а); вид сигналов «раскопки лопатой» на расстоянии 9 м от датчика по горизонтальной (б) и вертикальным (в) осям

Данное обстоятельство определило появление заключений вида «... анализ данных от распределенного волоконно-оптического датчика затруднен огромным уровнем помех» [23]. Для борьбы с помехами используются методы накопления, фильтрации. Наибольшее распространение получила вейвлет-фильтрация, позволяющая снизить уровень шума во всех частотных диапазонах. Большинство зарубежных исследований ориентировано на развитие этого направления.

В [24] утверждается, что обнаружение сигналов рамановского рассеяния на фоне нестационарных случайных процессов

оказалось неэффективным. Применение вейвлет-очистки шума позволило повысить отношение сигнал/шум на 11 дБ. Борьбе с шумами окружающей среды, влияющими на показатели фазочувствительной рефлектометрии (phi-OTDR) при обнаружении и локализации динамических возбуждений, посвящена работа [25]. Утверждается, что с использованием «специфического» спектрального анализа вероятность правильного обнаружения может быть доведена до 94 %, а уровень ложных тревог – до 6 %. Приемлемы ли эти цифры?

Существующий подход по оценке требуемых показателей охранных систем формируется на базе экспертных технологий. Вероятности правильного обнаружения 0,8; 0,9; 0,97 признаются как низкая, средняя и высокая «сигнализационная» надежность. Что касается помехоустойчивости метода, то одно ложное срабатывание в течение 100 ч и менее на участке протяженностью 250 м признается неудовлетворительным. В этом случае поток ложных тревог на участке 2,5 км превосходит границу, за которой служба безопасности перестает на них реагировать. Высокой помехоустойчивостью считается 1 ложное срабатывание в течение 1300–2500 часов на участке, обслуживаемом отдельной группой охраны. Опубликованные цифры по помехоустойчивости систем мониторинга состояния магистральных трубопроводов не отражают данный аспект проблемы, и существует потребность устранить этот пробел.

Целесообразно решать этот вопрос не с использованием экспертных технологий, а опираясь на принцип минимизации суммы потерь от терактов и расходов на защиту объекта [26].

Другая особенность обеспечения безопасности трубопроводного транспорта обусловлена необходимостью учета взаимодействия двух противоборствующих групп субъектов. Преступления совершают хорошо организованные структуры, которые «... щедро тратятся на подкуп нужных людей,

обучение своих специалистов, ... покупку спецсредств для активного противодействия полиции и службе безопасности...» [27]. Технология сокрытия похищаемого продукта путем закачки в трубопровод воды в объеме, равном отбираемому, – один из примеров «изобретательства» нападающей стороны. В патентной и периодической литературе описано множество предложений по маскировке производимых субъектом виброакустических сигналов. Промышленность выпускает широкую номенклатуру виброгенераторов для реализации этих целей. Установка такого генератора под слой грунта в охранной зоне, формирующего сейсмические сигналы «раскопки», создает серьезные проблемы для службы безопасности. На другие варианты решения задачи подготовленным нарушителем обращено внимание в [28]. К сожалению, этому аспекту противоборства групп не уделено должного внимания. Один из путей его решения рассмотрен ниже.

### Мультисенсорная система

В области охраны критически важных объектов сформировался перечень правил, которых следует придерживаться при конструировании физических систем по обеспечению их безопасности [28, 29]. Одно из них: если используемая система обнаружения не решает задачу с требуемой надежностью, необходимо комплексирование средств с различными физическими принципами реагирования на нарушителя. Для противодействия подготовленному «на дело» лицу следует применять комбинацию из двух, трех взаимодействующих систем. Если две из них характеризуются вероятностями обнаружения  $P_1$  и  $P_2$ , то итоговая вероятность составит величину

$$P_0 = P_1 + P_2 (1 - P_1).$$

При  $P_1 = P_2 = 0,8$ ,  $P_0 = 0,96$ . Данное правило широко используется за рубежом при конструировании так называемых мультисенсорных систем защиты периметра [30].

Помимо распределенных оптоволоконных систем для превентивной нейтрализации террористических угроз протяженным объектам оценивались возможности видеовиброаналитических и тепловизионных систем.

Видеоаналитикой называют технологию компьютерного анализа видеоданных с целью принятия решения о состоянии объекта наблюдения без участия человека. Достигнутые на сегодняшний день результаты: при использовании камеры с разрешением  $640 \times 480$  пикселей наблюдение можно вести на территории протяженностью до 200 м при осадках в виде снега интенсивностью до 0,5 мм/ч и скорости ветра до 8 м/с на динамичных природных фонах. Оценки вероятностей пропуска цели и ложной тревоги при обнаружении нарушителя по результатам испытаний составили  $0,041 \pm 0,003$  и  $0,003 \pm 0,001$  соответственно [31].

Виброаналитический метод основан на возбуждении упругих колебаний в оболочке трубы с последующим анализом зарегистрированных сигналов на заданном удалении от сечения их возбуждения [32]. При распространении волн по оболочке заглубленного трубопровода из-за значительного различия волновых сопротивлений металла и газа переизлучение энергии распространяющегося сигнала в перекачиваемый продукт ничтожно (при нормальном падении продольной волны на границу «сталь – воздух» («воздух – сталь») переизлучается только 0,002 % энергии, но заметная доля ее уходит в окружающий грунт). За счет утечки энергии в перекачиваемую жидкость затухание распространяющихся колебаний в их оболочке будет больше, нежели в газопроводах (через границу «вода – сталь» проходит порядка 12 % энергии колебаний и такого же порядка – в окружающий грунт). При изменении параметров почвогрунтов в локальной области (выход нефти, удаление грунта и др.) формируются локальные

переизлучения энергии распространяющегося по оболочке сигнала. В [31] сделан вывод о потенциальной возможности обнаружения изменений состояния трассы в 0,01 % по форме зарегистрированного сигнала – результата накопления 180 000 «прозванивающих» импульсов и продемонстрирована такая возможность в эксперименте при выявлении сформированного шурфа, установленного на трубу боеприпаса и т.д. В [33] показано, что локальное изменение физических параметров в околотрубном пространстве лучше обнаруживается по приращению энергии «прозванивающих» сигналов, нежели по изменению их формы. Модуль «генератор-приемник» позволяет контролировать участки трубопровода протяженностью 2 км и более. Для возбуждения упругих волн в оболочке трубы широко используются пьезокерамические возбудители в виде гибких поверхностных накладок различной формы [34].

Технология диагностики подземных трубопроводов по тепловому излучению с летательных аппаратов рассмотрена в [35]. Даже небольшие трещины в трубах приводят к появлению на поверхности грунта тепловых аномалий, позволяющих локализовать место утечки беспилотным летательным аппаратом [36]. Получены оценки по плотности ложных решений при обнаружении скрытых объектов разных форм на трассе пролегания трубопровода. Резкое снижение расходов на воздушный мониторинг состояния охранных зон при применении беспилотных летательных аппаратов (в 10 раз и более по сравнению с использованием вертолетов) позволило говорить о перспективности данной технологии. Опыты по выявлению утечек из трубопроводов в тепловом диапазоне оптических излучений описаны в [37, 38] и др. Завершается создание тепловой 3D-модели полей над заглубленным трубопроводом [39], интерес к использованию которой проявило ОАО «АК «Транснефть»» [40]. Также был поставлен вопрос о

необходимости обеспечения качественно нового уровня надежности нефтепроводов и нефтепродуктопроводов в условиях террористических угроз. ОАО «АК «Транснефть»» нацелена «...на создание комплексных систем безопасности, которыми можно будет управлять из единого центра» [40].

Создание комплексных (мультисенсорных по зарубежной терминологии) систем базируется на использовании метода анализа иерархий Саати [29]. Учитывая специфику рассматриваемой задачи, необходимо располагать специфическими данными о социально-экономической обстановке и «нравственном» здоровье населения в стране в текущий период и на ближайшую перспективу [26]. Однако в простейшем варианте решения этой задачи можно ограничиться следующим примером.

Рис. 4 иллюстрирует потери, которые несет собственник трубопроводной системы от нападений противоборствующей стороны. Чем меньше средств он вкладывает в обеспечение безопасности созданной инфраструктуры, тем больших потерь следует ожидать при ее эксплуатации.

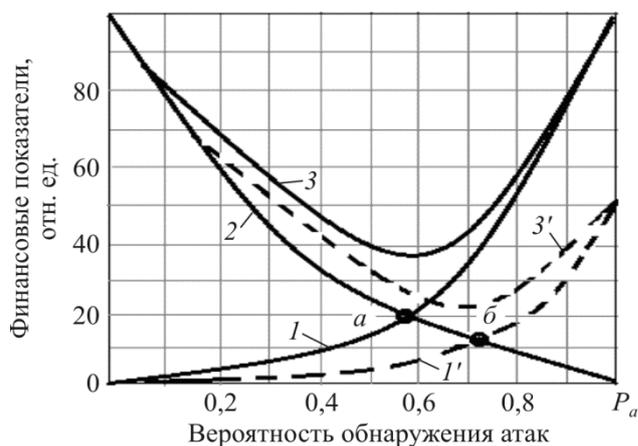


Рис. 4. Финансовые показатели противоборства сторон в зависимости от вероятности обнаружения атак  $P_a$ :  $1$  ( $1'$ ) – расходы на защиту при использовании односенсорной ( $1$ ) и мультисенсорной ( $1'$ ) систем;  $2$  – ущерб от пропущенных атак;  $3$  ( $3'$ ) – суммарные потери собственника объекта при использовании односенсорной ( $3$ ) и мультисенсорной ( $3'$ ) систем

Точка минимума суммарных потерь определяет требуемую вероятность обнаружения  $P_a$ . Собственнику объекта известны затраты на его защиту и потери от пропущенных атак. По ним можно оценить направление совершенствования системы противодействия для обеспечения оптимального значения указанной вероятности. Однако следует иметь в виду зависимость положения и формы кривых на рис. 4, отражающих расходные статьи, от многих факторов, динамика их изменения превышает возможности модернизировать имеющиеся системы противодействия угрозам в соответствии с требованиями текущего момента [5].

Анализ публикаций за прошедшее десятилетие позволяет сделать вывод, что в основу обеспечения безопасности магистральных трубопроводов от террористических угроз на ближайшую перспективу будет положена технология обнаружения активности в охранной зоне, реализованная с использованием распределенного волоконно-оптического датчика. Поэтому следует позаботиться о нейтрализации ложных решений, особенно в условиях создания искусственных помех в охранной зоне.

На сегодняшний день сформировалась точка зрения о необходимости дополнения оптоволоконных систем обнаружения несанкционированных работ одной из обозначенных выше подсистем. В рамках мультисенсорной системы требования к каждой из подсистем корректируются. В соответствии с рекомендациями [15] протяженность отдельного звена на базе волоконно-оптического датчика должна составлять порядка 40 км. Обнаружитель на его основе призван обеспечивать высокую вероятность правильного нахождения, в том числе за счет увеличения ложных решений. Задача взаимодействующей с ним системы – проверить, какое из поступающих решений правильное, а неправильное отсеять.

## Выводы

Обозначенные выше видеоаналитическая, виброакустическая и тепловизионная системы могут быть использованы для этой цели в виде различных комбинаций взаимодействия с базовым обнаружителем и между собой. Простейшая комбинация: «волоконно-оптический канал – виброаналитический канал – служба безопасности». Для каждого звена первого вида потребуется не менее 10 звеньев второго вида. Затраты энергии на работу виброаналитического звена – порядка 0,5 Дж. Поэтому в работу оно включается сигналами «появления нарушителя», поступающими с первого звена. Если плотность ложных решений с оптоволоконной системы обнаружения составит  $\leq 1 \text{ ч}^{-1}$ , проблема энергоэффективности мультисенсорной системы такого вида снимается. Учитывая, что в соответствии с теоретическим анализом вероятность ложных решений второго звена (признак удаления части грунта в окружении трубопровода) стремится к нулю, по прошествии времени на создание шурфа рассмотренная система будет удовлетворять по надежности обнаружения.

## Библиографический список

1. Елифанцев Б.Н., Пятков А.А., Федотов А.А. Концепция обеспечения безопасной работы магистральных трубопроводов в условиях внешних воздействий // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 12. – С. 42–49.
2. Цвяк А.В. Экологические последствия несанкционированных врезок в нефтепроводы и методы борьбы с ними // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 10 (185). – С. 445–447.
3. Vtorushina A.N., Anishchenko Y.V., Nikonova E.D. Risk assessment of oil pipeline accidents in special climatic conditions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012006. Ecology and safety in the

technosphere: All-Russian research-to-practice conference, 6–7 March 2017. – Yurga, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012006

4. Нелегальные врезки в нефтепроводы остаются нерешаемой проблемой для правоохранителей и законодателей [Электронный ресурс]. – URL: <https://versia.ru/nelegalnye-vrezki-v-nefteprovody-ostayutsya-ne-reshaemoj-problemoj-dlya-pravoohranitelej-i-zakono-datelej/> (дата обращения: 10.08.2018).

5. Безопасность магистральных трубопроводов в условиях террористических угроз: прогнозные оценки / В.А. Комаров, З.В. Семенова, Е.М. Михайлов, А.А. Нигрей, Д.А. Бронников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 88–100. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.8

6. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2016 году. – М., 2017. – 397 с.

7. Проект доклада о правоприменительной практике контрольно-надзорной деятельности в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору при осуществлении федерального государственного надзора в области промышленной безопасности за 2017 год. – М., 2018. – 66 с.

8. Фомин К. Сколько нефтеразливов – слишком много для Британского музея? [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.greenpeace.org/russia/ru/news/blogs/green-planet/blog/61117/> (дата обращения: 10.08.2018).

9. В решении проблемы разливов нефти намечился прогресс [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.greenpeace.org/russia/ru/news/2018/oil-0323/> (дата обращения: 10.08.2018).

10. Савина А.В. Анализ риска аварий при обосновании безопасных расстояний от магистральных трубопроводов сжиженного углекислого газа до объектов с присутствием людей: дис. ... канд. техн. наук. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 121 с.

11. Модель формирования тепловых изображений подстилающей поверхности охранных зон магистральных продуктопроводов: Отчет о НИР (заключительный) № ГР 115050610098 / СиБАДИ; рук. Д.С. Бронников; З.В. Семенова, Р.В. Борисов, В.А. Комаров, А.А. Нигрей, С.С. Жумажанова, Н.Н. Нигрей. – Омск, 2017. – 217 с.

12. Lou Z., Liu H., Hu M. A general survey on technological developments of oil leakage detection over the past decade // Applied Informatics and Communication. – 2011. – Vol. 31. – P. 16–22. DOI: 10.1007/978-3-642-23214-5\_79

13. Summary of detection and location for oil and gas pipeline leak / L. Wang [et al.] // 25 th Chinese Control and Detection Conference. – 2013. – № 656. – P. 821–826. DOI: 10.1109/CCDC.2013.6561035

14. Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring / M. Nikles, B. Vogel, F. Briffod, S. Grosswig, F. Sauser, S. Luebbecke, A. Bals, T. Pfeiffer // 11<sup>th</sup> SPIE Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, March 14–18, 2004. – San Diego. – 2004. – Vol. 5384. – P. 18–25. DOI: 10.1117/12.5400270

15. Duckworth G.L., Ku E.M. OptaSense (R) distributed acoustic and seismic sensing using COTS fiber optic cables for Infrastructure Protection and Counter Terrorism // Sensors, and command, control, communication, and intelligence (C3I) Technologies for homeland Security and homeland defense. – 2013. – Vol. 8711, № UNSP 871106. DOI: 10.1117/12.2017712

16. Duan L. Thermal noise-limited fiber-optic sensing at infrasonic frequencies // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2015. – Vol. 51, № 2. – P. 1–6. DOI: 10.1109/JQE.2014.2384914

17. Суворова Е. Вне зоны доступа // Трубопроводный транспорт нефти. – 2012. – № 6. – С. 34–35.

18. Волоконно-оптическая система мониторинга протяженных объектов

(нефтепроводов) на основе когерентного рефлектометра / Е.Т. Нестеров, К.В. Марченко, В.Н. Трещиков, А.В. Леонов // Т-Comm: телекоммуникации и транспорт. – 2014. – № 1. – С. 25–28.

19. Klar A., Linker R. Fiber optic sensing optical fibers detect tunnel-digging [Электронный ресурс] // Laser Focus World: Laser, Photonics, Optics News & Technology Advances. – URL: <http://www.laserfocus-world.com/articles/print/volume-45/issue-4/world-news/fiber-optic-sensing-optical-fibers-detect-tunnel-digging.html/> (дата обращения: 10.08.2018).

20. Шеховцов А.В., Мансуров М.Н., Голубин С.И. Экспериментальное исследование волоконно-оптического метода обнаружения утечек из нефтегазопроводов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2015. – № 6 (52). – С. 30–35.

21. Шестаков Р.А., Ганеева Л.К., Ганеева Л.К. Анализ волоконно-оптических методов обнаружения утечек в трубопроводах // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2015. – № 2 (279). – С. 56–64.

22. Сейсмические шумы индустриального города / В.Е. Коридалин [и др.] // ДАН СССР. – 1985. – Т. 280, № 5. – С. 1094–1097.

23. Кузнецов В.А., Цуканов В.Н., Яковлев М.Я. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы // Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники): материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. / ОАО ЦНИТИ «Техномаш». – М., 2006. – С. 342–349.

24. Wang J., Han J. A new noise suppression algorithm for optical fiber temperature surveillance of heavy oil thermal recovery well // International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications. – 2011. – Vol. 8199, № 81991. DOI: 10.1117/12.906604

25. Wu H., Li X., Peng Z. A novel intrusion signal processing method for phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Phi-OTDR) // 23 RD International conference

on Optical Fibre Sensors. – 2014. – Vol. 9157, № 91573. DOI: 10.1117/12.2058503

26. Епифанцев Б.Н., Пятков А.А. Предупреждение чрезвычайных ситуаций на магистральных продуктопроводах. Часть 1. Обнаружение несанкционированных вторжений в охранную зону продуктопровода: монография. – Омск: Изд-во СиБАДИ, 2013. – 122 с.

27. Оноприюк В. Ангарский излом // Трубопроводный транспорт нефти. – 2013. – № 6. – С. 32–38.

28. Звездинский С.С. Периметровые маскируемые сейсмические средства обнаружения // Специальная техника. – 2004. – №3. – С. 26–37.

29. Боровский А.С., Тарасов А.Д. Общая математическая модель системы физической защиты объектов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2011. – №10. – С. 21–29.

30. Concept of data processing in multi-sensor system for perimeter protection / R. Dulski [et al.] // Conference of Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defence X. – 2011. – Vol. 8019, № 8019–35. DOI: 10.1117/12.883965

31. Епифанцев Б.Н., Пятков А.А., Копейкин С.А. Мультисенсорные системы мониторинга территорий ограниченного доступа: возможность видеоаналитического канала обнаружения вторжений // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 121–129. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-121-129

32. Epifantsev B.N. An acoustic method for diagnostics of the state of underground pipelines: new possibilities // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50, № 5. – P. 254–257. DOI: 10.1134/S1061830914050039

33. Epifantsev B.N., Pyatkov A.A., Fedotov A.A. Evaluation of the sensitivity of a vibroacoustic detection system for local disturbances of trunk pipeline environmental parameters // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, № 2. – P. 70–78. DOI: 10.1134/S1061830915020035

34. Giurgintin V. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors. – New-York: Academic Press, 2007. – 760 p.

35. Елифанцев Б.Н. Дистанционная диагностика подземных трубопроводов по тепловому излучению // Дефектоскопия. – 2014. – № 3. – С. 28–39.

36. Врагова Е.В., Складов Л.А. Обнаружение утечек газа из магистральных газопроводов в тепловом поле излучения земной поверхности // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2009. – № 4. – С. 73–80.

37. Mucsi L. Application of GIS and aerial thermal image processing methods to solve environmental problems of the oil industry [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.geo.uszeged.hu/web/sites/default/files/publikaciok/ML/57.pdf/> (дата обращения: 10.08.2018).

38. Видеотепловизионный контроль состояния газопроводов с использованием сверхлегких летательных аппаратов / Л.Т. Кретов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 49–55.

39. Vaganova N. Mathematical model of testing of pipeline integrity by thermal fields // Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'14). – 2014. – Vol. 1631. – P. 37–41. DOI: 10.1063/1.4902455

40. Казначеев И. На территории риска // Трубопроводный транспорт нефти. – 2013. – № 6. – С. 30–31.

## References

1. Epifantsev B.N., Piatkov A.A., Fedotov A.A. Kontsepsiia obespecheniia bezopasnoi raboty magistralnykh truboprovodov v usloviakh vneshnikh vozdeistvii [Concept of ensuring operation of the main trunk lines under the conditions of external effects]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2013, no.12, pp.42-49.

2. Tsviak A.V. Ekologicheskie posledstviia nesanktsionirovannykh vrezok v nefteprovody i metody borby s nimi [Environmental impact unapproved inserts in the pipeline and methods

of combating them]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no.10 (185), pp.445-447.

3. Vtorushina A.N., Anishchenko Y.V., Nikonova E.D. Risk assessment of oil pipeline accidents in special climatic conditions. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012006. Ecology and safety in the technosphere: All-Russian research-to-practice conference*, Yurga, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012006

4. Nelegalnye vrezki v nefteprovody ostaiutsia ne reshaemoi problemoi dlia pravookhranitelei i zakonodatelei [Illegal cuttings in the oil pipeline remain an unresolved problem for law enforcers and legislators], available at: <https://versia.ru/nelegalnye-vrezki-v-nefteprovody-ostayutsya-ne-reshaemoj-problemoj-dlya-pravookhranitelej-i-zakonodatelej/> (accessed 10 August 2018).

5. Komarov V.A., Semenova Z.V., Mikhaylov E.M., Nigrey A.A., Bronnikov D.A. Security of major pipelines in presence of terroristic threats: prognostic estimates. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.17, no.1, pp.88-100. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.8

6. Godovoi otchet o deiatelnosti Federalnoi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2016 godu [Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2016]. Moscow, 2017, 397 p.

7. Proekt doklada o pravoprimeritelnoi praktike kontrolno nadzornoj deiatelnosti v federalnoi sluzhbe po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru pri osushchestvlenii federalnogo gosudarstvennogo nadzora v oblasti promyshlennoi bezopasnosti za 2017 god [Draft report on law enforcement practice of supervisory activities in the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in the implementation of federal state supervision in the field of industrial safety for 2017]. Moscow, 2018, 66 p.

8. Fomin K. Skolko nefteraizlivov – slishkom mnogo dlia Britanskogo muzeia? [How many oil spills – are too much for the British Museum?], available at: <http://www.greenpeace.org/russia/ru/news/blogsgreen-planet/blog/61117/> (accessed 10 August 2018).
9. V reshenii problemy razlivov nefti nametilsia progress [Progress has been made in solving the problem of oil spills], available at: <http://www.greenpeace.org/russia/ru/news/2018/oil-0323/> (accessed 10 August 2018).
10. Savina A.V. Analiz riska avarii pri obosnovanii bezopasnykh rasstoianii ot magistralnykh truboprovodov szhizhennogo uglekislogo gaza do obektov s prisutstviem liudei [Analysis of the risk of accidents in the justification of safe distances from the main pipelines of liquefied carbon dioxide to objects with the presence of people]. Ph. D. thesis. Moscow, 2013, 121 p.
11. Bronnikov D.S., Semenova Z.V., Borisov R.V., Komarov V.A., Nigrei A.A., Zhumazhanova S.S., Nigrei N.N. Model formirovaniia teplovykh izobrazhenii podstilaiushchei poverkhnosti okhrannykh zon magistral'nykh produktoprovodov [Model of thermal imaging of the underlying surface of the trunk pipelines protected zones]. *Otchet o NIR (zakliuchitelnyi) no. GP 115050610098.* Omsk, 2017, 217 p.
12. Lou Z., Liu H., Hu M. A general survey on technological developments of oil leakage detection over the past decade. *Applied Informatics and Communication*, 2011, vol. 31, pp. 16-22. DOI: 10.1007/978-3-642-23214-5\_79
13. Wang L. et al. Summary of detection and location for oil and gas pipeline leak. *25<sup>th</sup> Chinese Control and Detection Conference*, 2013, no.656, pp.821-826. DOI: 10.1109/CCDC.2013.6561035
14. Nikles M., Vogel B., Briffod F., Grosswig S., Sauser F., Luebbecke S., Bals A., Pfeiffer T. Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring. *11<sup>th</sup> SPIE Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, March 14–18, 2004, San Diego, 2004, vol. 5384, pp. 18-25. DOI: 10.1117/12.5400270
15. Duckworth G.L., Ku E.M. OptaSense (R) distributed acoustic and seismic sensing using COTS fiber optic cables for Infrastructure Protection and Counter Terrorism. *Sensors, and command, control, communication, and intelligence (C3I) Technologies for homeland Security and homeland defense*, 2013, XII. vol.8711, no.UNSP 871106. DOI: 10.1117/12.2017712
16. Duan L. Thermal noise-limited fiber-optic sensing at infrasonic frequencies. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015, vol.51, no.2, pp.1-6. DOI: 10.1109/JQE.2014.2384914
17. Suvorova E. Vne zony dostupa [Out of range]. *Truboprovodnyi transport nefti*, 2012, no.6, pp.34-35.
18. Nesterov E.T., Marchenko K.V., Treshchikov V.N., Leonov A.V. Volokonno-opticheskaia sistema monitoringa protiazhennykh obektov (nefteprovodov) na osnove kogerentnogo reflektometra [Fiber optic system for monitoring extended facilities (oil pipelines) using a coherent reflectometer]. *T-Comm: telekommunikatsii i transport*, 2014, no.1, pp.25-28.
19. Klar A., Linker R. Fiber optic sensing optical fibers detect funnel-digging. *Laser Focus World: Laser, Photonics, Optics News & Technology Advances*, 2009, available at: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-45/issue-4/world-nws/fiber-optic-sensing-optical-fibers-detect-tunnel-digging.html/> (accessed 10 August 2018).
20. Shekhovtsov A.V., Mansurov M.N., Golubin S.I. Eksperimentalnoe issledovanie volokonno-opticheskogo metoda obnaruzheniia utechek iz neftegazoprovodov [Experimental studies of fiber-optic method of detecting leaks in oil and gas pipelines]. *Truboprovodnyi transport: teoriia i praktika*, 2015, no.6 (52), pp.30-35.
21. Shestakov R.A., Ganeeva L.K., Ganeeva L.K. Analiz volokonno-opticheskikh metodov obnaruzheniia utechek v truboprovodakh [Analysis of fiber-optic leak

detection system in pipeline]. *Trudy RGU nefti i gaza imeni I.M. Gubkina*, 2015, no.2 (279), pp.56-64.

22. Koridalin V.E. et al. Seismicheskie shumy industrialnogo goroda [Seismic noise of an industrial city]. *DAN SSSR*, 1985, vol.280, no.5, pp.1094-1097.

23. Kuznetsov V.A., Tsukanov V.N., Iakovlev M.Ia. Volokonno-opticheskie informatsionno-izmeritelnye sistemy [Fiber-optical information measuring systems]. *Vysokie tekhnologii v promyshlennosti rossii (materialy i ustroistva funktsionalnoi elektroniki i mikrofoniki)*. *Materialy XII mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Moscow, OAO TSNITI "Tekhnomash", 2006, pp.342-349.

24. Wang J., Han J. A New noise suppression algorithm for optical fiber temperature surveillance of heavy oil thermal recovery well. *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications*, 2011, vol.8199, no.81991. DOI: 10.1117/12.906604

25. Wu H., Li X., Peng Z. A novel intrusion signal processing method for phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Phi-OTDR). *23RD International conference on Optical Fibre Sensors*, 2014, vol.9157, no.91573. DOI: 10.1117/12.2058503

26. Epifantsev B.N., Piatkov A.A. Preduprezhdenie chrezvychainykh situatsii na magistralnykh produktoprovodakh. Part 1. Obnaruzhenie nesanktsionirovannykh vtorzhenii v okhrannuiu zonu produktoprovoda [Prevention of emergency situations on trunk pipelines. Part 1. Detection of unauthorized intrusions into the security zone of the pipeline]. Omsk, Izdatelstvo SibADI, 2013, 122 p.

27. Onopriuk V. Angarskii izlom [Ангарский излом]. *Truboprovodnyi transport nefti*, 2013, no.6, pp.32-38.

28. Zvezhinskii S.S. Perimetrovye maskiruemye seismicheskie sredstva obnaruzheniia [Perimeter masked seismic detection tools]. *Spetsialnaia tekhnika*, 2004, no.3, pp.26-37.

29. Borovskii A.S., Tarasov A.D. Obshchaia matematicheskaia model sistemy fizicheskoi zashchity obektov [General mathematical model of the system of physical protection of objects]. *Vestnik kompiuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2011, no.10, pp.2-29.

30. Dulski R. et al. Concept of data processing in multi-sensor system for perimeter protection. *Conference of Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defence X*, 2011, vol.8019, no.8019-35. DOI: 10.1117/12.883965

31. Epifantsev B.N., Piatkov A.A., Kopeikin S.A. Multisensornye sistemy monitoringa territorii ogranichenogo dostupa: vozmozhnost videoanaliticheskogo kanala obnaruzheniia vtorzhenii [Multi-sensor systems for monitoring access to restricted areas: capabilities of the intrusion detection video analytical channel]. *Kompiuternaia optika*, 2016, vol.40, no.1, pp.121-129. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-121-129

32. Epifantsev B.N. An acoustic method for diagnostics of the state of underground pipelines: new possibilities. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol.50, no.5, pp.254-257. DOI: 10.1134/S1061830914050039

33. Epifantsev B.N., Pyatkov A.A., Fedotov A.A. Evaluation of the sensitivity of a vibroacoustic detection system for local disturbances of trunk pipeline environmental parameters. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol.51, no.2, pp.70-78. DOI: 10.1134/S1061830915020035

34. Giurgintin V. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors. New-York, Academic Press, 2007, 760 p.

35. Epifantsev B.N. Dstantsionnaia diagnostika podzemnykh truboprovodov po teplovomu izlucheniiu [Remote diagnostics of underground pipelines for thermal radiation]. *Defektoskopiia*, 2014, no.3, pp.28-39.

36. Vragova E.V., Skliarov L.A. Obnaruzhenie utechek gaza iz magistralnykh gazoprovodov v teplovom pole izlucheniia zemnoi poverkhnosti [Detection of gas leaks from gas pipelines in the thermal field of radiation of the earth's surface]. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii*, 2009, no.4, pp.73-80.

37. Mucsi L. Application of GIS and aerial thermal image processing methods to solve environmental problems of the oil industry, available at: <http://www.geo.u-szeged.hu/web/sites/default/files/publikaciok/ML/57.pdf/> (accessed 10 August 2018).

38. Kretov L.T. et al. Videoteplovizionnyi kontrol sostoianiiia gazoprovodov s ispolzovaniem sverkhlegkikh letatelnykh apparatov [Videoteplovizionnyi control of gas with microlights]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2014, no.3, pp.49-55.

39. Vaganova N. Mathematical model of testing of pipeline integrity by thermal fields. *Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'14)*, 2014, vol.1631, pp.37-41. DOI: 10.1063/1.4902455

40. Kaznacheev I. Na territorii riska [At risk]. *Truboprovodnyi transport nefti*, 2013, no.6, pp.30-31.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

О структуре системы физической защиты магистральных трубопроводов от преднамеренных угроз / В.А. Комаров, З.В. Семенова, Д.А. Бронников, А.А. Нигрей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т.19, №1. – С.87–100. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.7

Please cite this article in English as:

Komarov V.A., Semenova Z.V., Bronnikov D.A., Nigrei A.A. About the structure of the system of physical protection of main pipelines against intended threats. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol.19, no.1, pp.87-100. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.7