

МЕТОДИКА АЭРОМОНИТОРИНГА ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

А.П. Корольков, кандидат технических наук, профессор;

Д.А. Колесников.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Своевременное прогнозирование аварий линейной части магистральных газопроводов позволяет предотвратить возникновение пожаров и взрывов, экологический и материальный ущерб. Применяемые в этих целях методы являются инструментом мониторинга безопасной эксплуатации сложных технических систем. Несмотря на это, остается ряд нерешенных задач, для решения которых авторами рассматриваются недостатки методик обследования линейной части магистральных газопроводов и описывается методика мониторинга, основанная на применении беспилотных воздушных судов и нейросетевых методов прогнозирования.

Ключевые слова: магистральный газопровод, пожаровзрывобезопасность, пожар, взрыв, методы мониторинга, беспилотное воздушное судно, аэромониторинг

METHOD OF AERO MONITORING OF FIRE AND EXPLOSION SAFETY OF THE LINEAR PART OF THE MAIN GAS PIPELINES

A.P. Korolkov; D.A. Kolesnikov.

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

Timely prediction of accidents of the linear part of the main gas pipelines can prevent the occurrence of fires and explosions, environmental and material damage. The methods used for this purpose are a tool for monitoring the safe operation of complex technical systems. Despite this, a number of unresolved problems remain. To solve these problems, the authors consider the shortcomings in the methods for examining the linear part of the main gas pipelines and describe a monitoring technique based on the use of unmanned aircraft and neural network forecasting methods.

Keywords: main gas pipeline, fire and explosion safety, fire, explosion, methods of monitoring, drone, aero monitoring

На сегодняшний день технологии аэрокосмических методов мониторинга активно внедряются в практическую деятельность газотранспортных предприятий Российской Федерации. В целях идентификации, анализа и прогнозирования рисков аварий разработаны различные способы технической диагностики, наибольшую популярность из которых набирают методы дистанционного мониторинга, основанные на применении беспилотных воздушных судов.

Возможности современных средств прогнозирования чрезвычайных ситуаций (ЧС) с каждым днем усиливаются методами аэромониторинга, они нацелены на определение следующих характеристик: время и место наступления ЧС; вероятность возникновения ЧС; характер и масштаб возможных последствий ЧС [1].

Информация, получаемая с помощью беспилотных воздушных судов, меньше зависит от высокой облачности, а также она существенно дешевле, чем получаемая при использовании пилотируемой авиации и космических систем. Расширение возможностей

методов мониторинга технического состояния магистральных газопроводов (МГ) позволяет повысить надежность эксплуатации газотранспортных систем в целом.

Необходимо отметить, что к мониторингу технического состояния МГ должны предъявляться повышенные требования. Это обусловлено как причинами технического, экологического характера, так и масштабным ущербом в случае аварии и перехода объекта мониторинга во взрывопожароопасное состояние.

Существующие методики дистанционного мониторинга в основном учитывают значения наиболее важных внутренних параметров объекта. При этом не учитывают изменения параметров внешней среды, влияющих на пожаровзрывобезопасность газотранспортных систем. Совокупность наступления предельных значений внутренних и внешних параметров пожаровзрывоопасных объектов может приводить к более тяжелым последствиям, чем при их раздельном проявлении. Разработка строгих критериев пожаровзрывобезопасности, учет взаимосвязанности и синергетического наложения параметров друг на друга позволит устранить недостатки существующих систем мониторинга.

Несмотря на то, что при помощи применяемых для проведения локального аэромониторинга МГ методик успешно решаются вопросы контроля за: незаконными врезками, утечками газа, лесными пожарами, незаконными вырубками леса, проведением археологических раскопок, проведением геодезической разведки и другими нерегламентированными действиями в охранной зоне и зоне минимально безопасных расстояний газопроводов, имеется ряд нерешенных задач. Поэтому существующие методики не применимы в целях мониторинга пожаровзрывобезопасности линейной части магистральных газопроводов (ЛЧМГ).

В связи с этим весьма актуальным является вопрос разработки и внедрения в практику методики контроля пожаровзрывобезопасности ЛЧМГ с использованием беспилотных воздушных судов.

Полеты воздушных судов в воздушном пространстве Российской Федерации выполняются по воздушным трассам, местным воздушным линиям (МВЛ) и по установленным маршрутам. Направление, ширина воздушных трасс МВЛ и установленных маршрутов, а также эшелоны (высоты) полетов устанавливаются с соблюдением требований безопасности полетов и с учетом интересов соответствующих министерств, государственных комитетов, ведомств и организаций в порядке, определяемом Положением об использовании воздушного пространства [2, 3].

Воздушный мониторинг технического состояния ЛЧМГ проводится в соответствии с методиками вертолетного обследования и с требованиями нормативно-технических документов ПАО «Газпром». Методики обнаружения утечек газа основаны на применении различных диагностических приборов: лазерного локатора утечек газа «Аэропоиск», «Пергам», «ЛУГ». Обследования выполняются на основе предварительно выстраиваемых маршрутов обследования участков МГ. При этом полет проводится с подветренной стороны, отклонение маршрута от места залегания трубопровода не менее 3 м и не более 20 м.

В результате обработки данных при помощи программного обеспечения информация, получаемая во время обследования, записывается в память компьютера, установленного на борту вертолета, а также вычисляется концентрация газа вдоль длины оптического пути от прибора до топографического объекта.

Исходя из анализа данных, представленных в технических отчетах по вертолетным обследованиям, эксплуатируемых ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» МГ, проведенных в соответствии с требованиями описанных методик, составлен график распределения дефектов по годам. Из графика (рис. 1) следует отсутствие линейной зависимости в процессе обнаружения утечек газа.

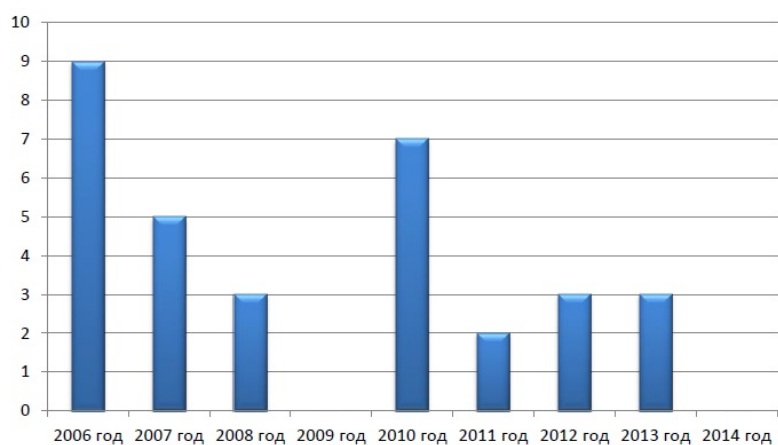


Рис. 1. Общее количество обнаруженных дефектов в ходе вертолетного обследования участков МГ

Более объективно информацию по обнаруженным дефектам можно представить в виде диаграммы распределения дефектов на равных по длине участках обследования. Для удобства представления информации часть МГ, подверженная обследованию, разбита на элементарные участки, каждый длиной 100 км (рис. 2).

Проанализировав долю каждого типа дефектов в общем массиве дефектов за период с 2006 по 2014 гг. (с 2015 г. вертолетное патрулирование, ввиду экономического фактора, является локальным и целевым), получим диаграмму, представленную на рис. 3.

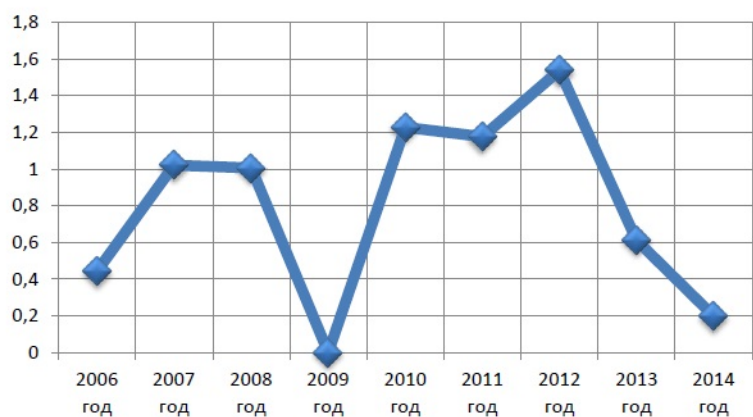


Рис. 2. Количество дефектов, приходящихся на обследуемые участки МГ (100 км каждый)

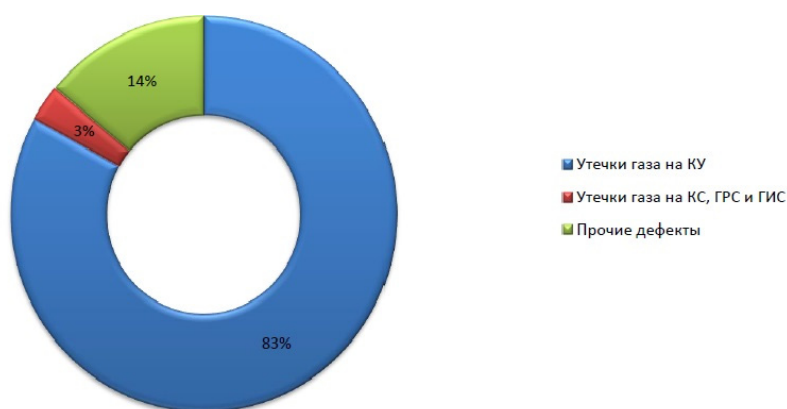


Рис. 3. Диаграмма распределения типов обнаруженных дефектов

Из рис. 3 отчетливо видно, что основную долю дефектов составляют утечки газа на крановых узлах – 83 %.

Считается, что описанная выше технология позволяет обнаруживать утечки газа из МГ при однократном следовании по контролируемому участку. Однако неравномерное распределение атмосферного давления вызывает ускорение воздушных потоков. При этом ускорение тем большее, чем больше горизонтальный барический градиент. Следовательно, воздух стремится двигаться по направлению этого градиента.

Скорость и направление воздуха зависит и от других действующих сил. Это, прежде всего, сила Кориолиса. Значение силы Кориолиса для ветра является величиной того же порядка, что и ускорение, создаваемое барическим градиентом. Поворотное ускорение или ускорение Кориолиса может быть представлено выражением:

$$A = 2 \cdot \omega \cdot V \cdot \sin Y, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения Земли; V – скорость ветра; Y – географическая широта.

Формула (1) указывает на то, что ускорение имеет наибольшее значение в полярных широтах и сводится в нуль на экваторе. Этот факт указывает на необходимость учета географических координат при проведении обследования газопроводов с целью определения отклонений облаков утечки от линии залегания МГ.

Так как вертолетное обследование проводится с борта вертолета на высоте 60–90 м в приземном слое атмосферы, называемом слоем трения, методики воздушного мониторинга должны учитывать горизонтальную составляющую распространения утечек газа, выражаемую барическим законом ветра.

Скорость и направление воздушного потока, оказывающие влияние на траекторию движения газа при возникновении утечки из МГ, в зависимости от атмосферных явлений, подвержены резкому изменению значений, что представлено на графиках (рис. 4). В применяемых на сегодняшний день методиках аэромониторинга эти параметры учету не подлежат.

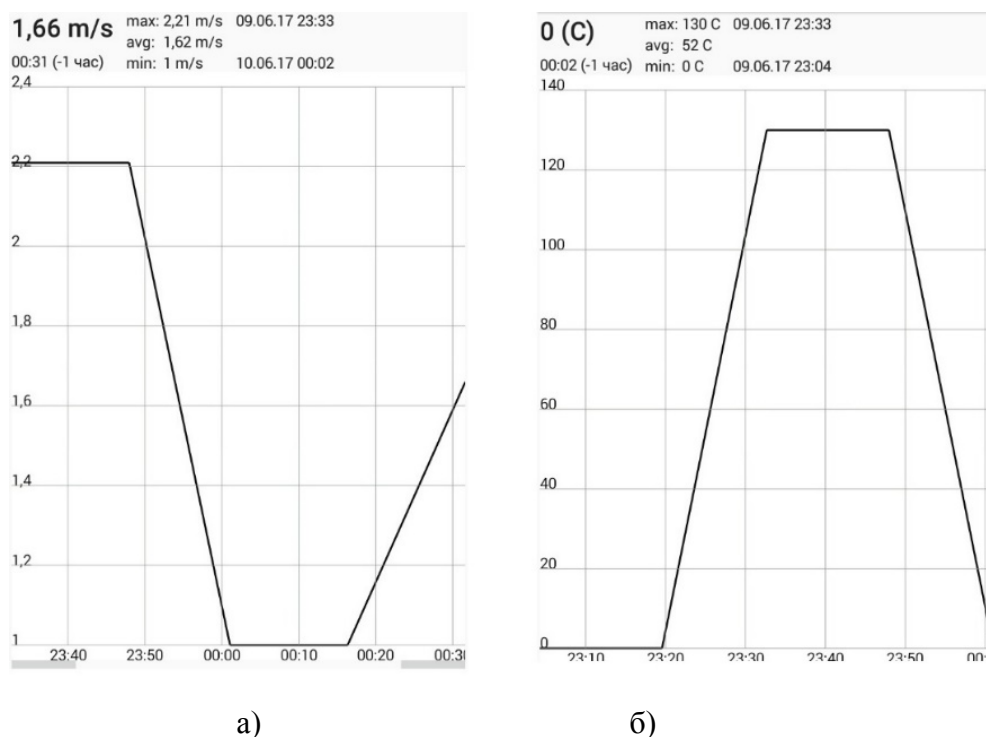


Рис. 4. Графики изменения скорости и направления ветра в течение часа:
а) график изменения скорости ветра; б) график изменения направления ветра

Одним из недостатков применяемых методик дистанционного обнаружения утечек газа из МГ и дефектов их конструктивных элементов является неучет такого параметра, как вертикальная составляющая скорости ветра в приземном слое воздуха в режиме реального времени.

Этот недостаток может быть компенсирован проведением мониторинга ЛЧМГ при помощи различных программно-аппаратных комплексов (ПАК), например ПАК «ТОКСИ+Метео». Этот комплекс позволяет в режиме реального времени с учетом данных, получаемых от портативной метеостанции, формировать прогноз рассеивания и отображать зоны загрязнения [4].

Описанный ПАК трудноприменим в целях обследования ЛЧМГ, ввиду линейной протяженности участков и отсутствия возможности использования портативных метеостанций по всей их длине. Альтернативой использования портативных метеостанций является наличие глобальной базы статистических данных и мощных вычислительных средств.

Такие вычислительные средства применяются при расчете траекторий воздушных потоков приземного слоя атмосферы в одной из наиболее широко используемых моделей HYSPLIT (рис. 5). Эта модель является описанием комплексной системы, учитывающей параметры атмосферного переноса, дисперсионные распределения и химические реакции веществ. Экспериментальная проверка теоретических данных доказывает, что результаты вертикального распределения модуля скорости ветра близки к реальным. Наиболее значимая, в целях обнаружения утечек газа из МГ, горизонтальная составляющая направления скорости ветра в приземном слое совпадает с расчетным значением, в пределах доверительной вероятности.

Метод расчета модели представляет собой гибридный метод Лагранжа, использующий для расчетов адвекции и диффузии систему отсчета со смещающейся сеткой, при перемещении траекторий воздушных потоков от исходного местоположения и Эйлеровой методологии, в которой используется фиксированная трехмерная сетка системы отсчета для расчета концентраций загрязняющих веществ [5].

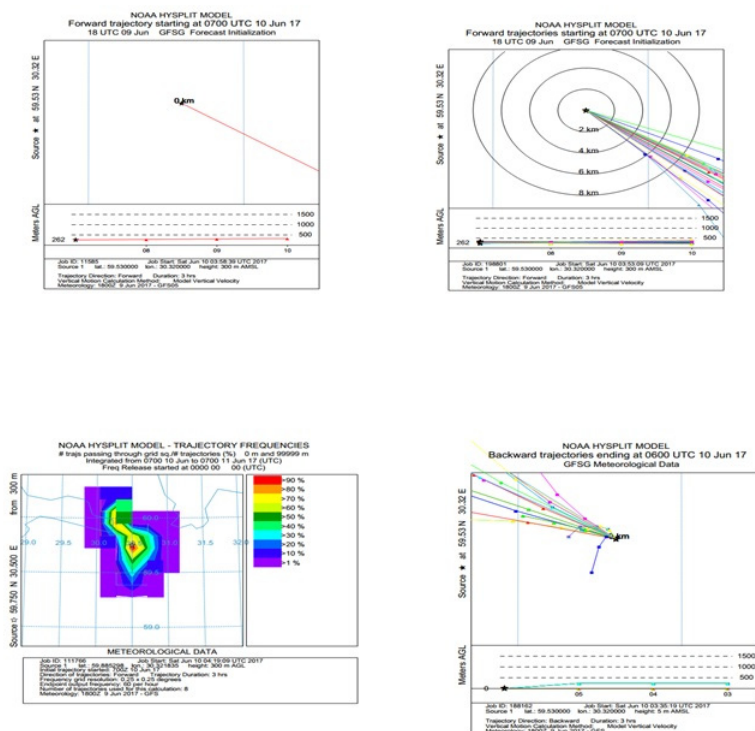


Рис. 5. Графики траекторий распространения утечек газа, полученные при использовании модели атмосферного переноса HYSPLIT

Дисперсия загрязняющего вещества рассчитывается, предполагая либо распыление, либо рассеивание частиц. Расчеты с применением модели проводятся посредством сети Интернет через систему ARL READY, в этом случае модель имеет те же характеристики, но ограничивает пользователя наличием не полного набора инструментов. Веб-версия настроена с некоторыми ограничениями для того чтобы избежать вычислительной насыщенности веб-сервера ARL. Версия идентична зарегистрированной версии, полученные траектории газа утечек не имеют ограничений использования для составления прогнозов, в том числе по архивным данным.

Частной задачей, решаемой с помощью модели HYSPLIT, является обратный траекторный анализ для определения места утечки. Отметим тот факт, что продолжительность существования молекулы метана в атмосфере в среднем составляет пять лет. Благодаря использованию модели HYSPLIT для обратного траекторного анализа, имеется возможность достоверного определения места утечки. Расчет прямых и обратных траекторий позволяет описать движение воздушного потока для прогнозирования мест возможного переноса утечек в разных пространственных и временных диапазонах [6].

Траектории, рассчитанные с помощью модели, позволяют составлять маршруты полета беспилотного воздушного судна в целях обследования участков ЛЧМГ на предмет утечек газа с учетом скорости и направления, проводить расчет отклонений от линии залегания газопровода.

Описание методики аэромониторинга пожаровзрывобезопасности ЛЧМГ

Начальным этапом проведения аэромониторинга участков ЛЧМГ является запуск беспилотного воздушного судна (комплекс оперативного мультиспектрального мониторинга Арнега-ДСТИ на базе DJI Inspire 1) (рис. 6) и движение по составленному маршруту. Рабочие частоты дистанционного управления беспилотным воздушным судном составляют: 5,728~5,850 ГГц; 2,400~2,483 ГГц.



Рис. 6. Комплекс оперативного мультиспектрального мониторинга Арнега-ДСТИ на базе DJI Inspire 1

На следующем этапе производится контроль охранных зон трубопроводов. Этот этап производят, используя программу синхронизации фото и видеоизображений с Google картами. Фото и видео данные позволяют классифицировать объекты, попадающие в охранную зону или зону минимально безопасных расстояний, и с большой точностью определять расстояния до оси линейных объектов (рис. 7). Полученные изображения выводятся на монитор ноутбука, находящегося на земле оператора. Передача видеосигнала на землю производится по отдельному от командной линии каналу, чтобы не влиять на управляемость беспилотного воздушного судна.

Для трансляции и кодирования данных применяется установленная в ноутбук программа OBS Studio software. На втором этапе проводится дальнейший анализ полученных при помощи модели HYSPLIT данных (в виде векторов, преобразуемых в матрицы) с результатами других видов диагностики, проектной и эксплуатационной документации и данных технической диагностики участков МГ. На этом этапе с помощью трехслойной рекуррентной нейронной сети производится классификация участков ЛЧМГ в одно из двух возможных состояний: пожаровзрывобезопасное или взрывопожароопасное. При этом эффективность использования нейронной сети определяется теоремой о полноте. Смысл этой теоремы в том, что персептрон со скрытым слоем способен аппроксимировать функцию неизвестного состояния переменной с произвольной степенью точности при условии выбора достаточного числа нейронов скрытого слоя. Требуемое количество нейронов в скрытом слое сети определяется из формулы:

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \geq N \left(\frac{Q}{N_y} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y$$

где N_x – размерность входного сигнала; N_y – размерность выходного сигнала; N_w – необходимое число синаптических связей; Q – число элементов множества обучающих примеров.

После предобработки и преобразования текущие значения параметров мониторинга поступают для аппроксимации в нейронную сеть. Аппроксимация функции происходит следующим образом: на входы нейронной сети поступают значения параметров мониторинга, таких как: скорость ветра, направление ветра, температура окружающей среды, минимальная энергия зажигания смеси газа с окислителем, наличие открытого горения и направление распространения фронта пламени в сторону оси объекта мониторинга, позволяющие классифицировать состояние взрывопожароопасности участка газопровода.

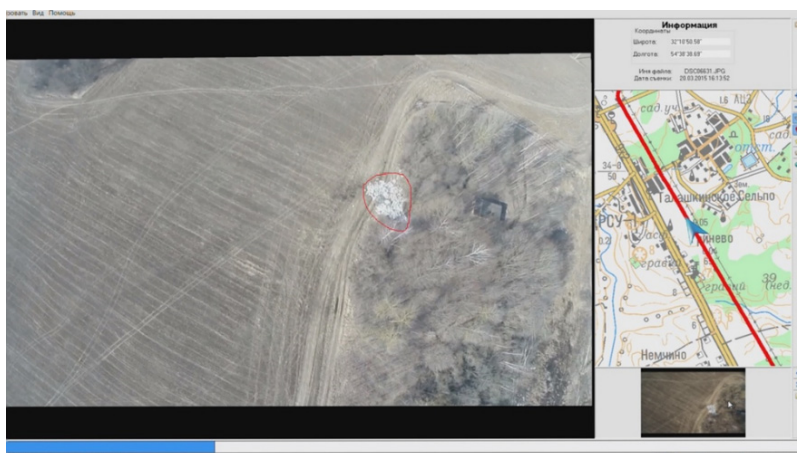


Рис. 7. Скриншот программы синхронизации фото и видеозаписей с Google картами

Обнаружение утечек газа производится с помощью установленного на беспилотное воздушное судно лазерного лидара – портативного лазерного детектора газов Tokyo Gas Engineering Laser Methane mini-G. Возможность зажигания газа определяется с помощью показателя наличия потенциального источника зажигания достаточной мощности для инициирования горения. Также в расчете учитывается компонентный состав транспортируемой смеси и наличие балластных примесей, не вступающих в реакции с окислителем.

Еще одним параметром, характеризующим пожаровзрывобезопасность линейного участка МГ, является $P_{КМГ}$ – комплексный показатель технического состояния, определяемый по результатам внутритрубной диагностики (ВТД), электрометрических обследований, технического диагностирования в шурфах и других обследований [7]. Определение комплексного показателя технического состояния линейного участка МГ проводят в соответствии со схемой, представленной на рис. 8.



Рис. 8. Структурная схема определения комплексного показателя технического состояния линейного участка МГ по результатам ВТД и других обследований (ЗРА – запорно-регулируемая арматура)

С учетом этого показателя, на основании результатов диагностирования формируются коррозионные карты. Коррозионные карты предварительно заносятся в базу данных в электронном виде, после этого составляется координатная привязка для мониторинга коррозионно-опасных участков МГ.

Комплексный показатель технического состояния линейного участка МГ $P_{КМГ}$ определяют по формуле:

$$P_{КМГ} = 1 - (1 - p_{тк}) \cdot (1 - v_{ш} \cdot p_{ш}) \cdot (1 - d_{\sigma}) \cdot (1 - v_a \cdot p_a) \cdot (1 - v_p \cdot p_p) \cdot (1 - d_f^4),$$

где $p_{тк}$ – показатель технического состояния труб и соединительных деталей, используемый при определении комплексного показателя; $p_{ш}$ – показатель технического состояния сварных швов; d_{σ} – поврежденность линейного участка МГ от повышенного уровня напряжений; v_a – весовой коэффициент, равный 0,1; $v_{ш}$ – весовой коэффициент, равный 0,7; p_a – показатель технического состояния трубопроводной арматуры; v_p – весовой коэффициент, равный 0,3; p_p – показатель технического состояния защитного покрытия; d_f – поврежденность линейного участка МГ от переменных нагрузок.

Получаемые в режиме реального времени текущие значения параметров мониторинга с борта беспилотного воздушного судна поступают на входы нейронной сети. Это такие параметры, как: рабочее давление на участке магистрального газопровода; давление в МГ при образовании утечки; температура перекачиваемого природного газа; температура воздуха в зоне участка мониторинга; средняя температура газа внутри участка мониторинга; комплексный показатель технического состояния ЛЧМГ; показатель наличия утечки газа на участке газопровода; показатель наличия источника инициирования горения; показатель компонентного состава газа; показатель, учитывающий скорость ветра; показатель, учитывающий направление ветра.

Более подробное описание принципов построения систем мониторинга, выбор контролируемых параметров, подбор критериев, структуры и описание алгоритма функционирования нейросетевой модели мониторинга пожаровзрывоопасности ЛЧМГ сформулировано и представлено в предыдущей публикации [8].

В результате обработки рекуррентной нейронной сетью входных параметров по заданным критериям оценки взрывопожароопасности ЛЧМГ на выходе формируется значение показателя пожаровзрывобезопасности участка $R_{ПВБ}$. Исходя из значения $R_{ПВБ}$, делается вывод о фактическом состоянии пожаровзрывобезопасности обследуемого участка.

Настоящая методика разработана на основе системного подхода с учетом явных и скрытых факторов, влияющих на пожаровзрывобезопасность ЛЧМГ.

Организация практического применения методики, за счет внедрения современных технологий и средств воздушного патрулирования трубопроводов, позволит обеспечить максимальный прирост величины прогнозного горизонта состояния пожаровзрывобезопасности газопроводов, а также совершенствование методов прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации газотранспортных систем.

Литература

1. Современные системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций: монография / под общ. ред. В.А. Пучкова. М.: ФКУ ЦСИ ГЗ МЧС России, 2013. 336 с.
2. Воздушный кодекс Рос. Федерации (с изм. от 29 июля 2017 г.; в ред. от 30 сент. 2017 г.). М.: Собр. законодательства Рос. Федерации. 1997. № 12. Ст. 1 383.
3. Чуприян А.П. Методические рекомендации по производству полетов беспилотных воздушных судов в системе МЧС России. М.: МЧС России, 2016. С. 1–59.
4. Программно-аппаратный комплекс «ТОКСИ+МЕТЕО» для оценки последствий возможных аварий с учетом данных о текущих погодных условиях / А.А. Акопов [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 1. С. 22–25.
5. Arya S.P. Air Pollution Meteorology and Disper-sion. Oxford University Press, 1999. 310 pp.
6. Draxler R.R., Hess G.D. Description of the HYSPLIT_4 modeling system. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, 1997. 24 pp. [Available from National Tech-nical Information Service, 5285 Port Royal Road, Springfield, VA 22161.].
7. Василевич А.В. Повышение эффективности диагностики магистральных газопроводов: монография. СПб., 2009. С. 134.
8. Корольков А.П., Минкин Д.Ю., Колесников Д.А. Нейросетевая модель функционирования системы мониторинга пожаровзрывоопасности линейной части магистральных газопроводов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2017. № 3 (43). С. 95–101.

References

1. Sovremennyye sistemy monitoringa i prognozirovaniya chrezvychajnyh situacij: monografiya / pod obshch. red. V.A. Puchkova. M.: FKH CSI GZ MCHS Rossii, 2013. 336 s.
2. Vozdushnyj kodeks Ros. Federacii (s izm. ot 29 iyulya 2017 g.; v red. ot 30 sent. 2017 g.). M.: Sobr. zakonodatel'stva Ros. Federacii. 1997. № 12. St. 1 383.

3. Chupriyan A.P. Metodicheskie rekomendacii po proizvodstvu poletov bespilotnyh vozdushnyh sudov v sisteme MCHS Rossii. M.: MCHS Rossii, 2016. S. 1–59.
4. Programmno-apparatnyj kompleks «TOKSI+METEO» dlya ocenki posledstvij vozmozhnyh avarij s uchetom dannyh o tekushchih pogodnyh usloviyah / A.A. Akopov [i dr.] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2011. № 1. S. 22–25.
5. Arya S.P. Air Pollution Meteorology and Disper-sion. Oxford University Press, 1999. 310 pp.
6. Draxler R.R., Hess G.D. Description of the HYSPLIT_4 modeling system. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, 1997. 24 pp. [Available from National Tech-nical Information Service, 5285 Port Royal Road, Springfield, VA 22161.].
7. Vasilevich A.V. Povysenie ehffektivnosti diagnostiki magistral'nyh gazoprovodov: monografiya. SPb., 2009. S. 134.
8. Korol'kov A.P., Minkin D.Yu., Kolesnikov D.A. Nejrosetevaya model' funkcionirovaniya sistemy monitoringa pozharovzryvoopasnosti linejnoj chasti magistral'nyh gazoprovodov // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2017. № 3 (43). S. 95–101.