

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А. А. Сорокин, А. С. Шепотько, С. Ю. Страхов, А. С. Стукалова

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Поступила в редакцию 16.02.2017 г.

Аннотация. Рассмотрены практические вопросы, связанные с применением технологии нейронных сетей для обработки данных спектральных измерений. Исследуются особенности реализации и преимущества данной технологии при ее использовании в детекторе следов взрывчатых и других опасных веществ на предметах, основанном на принципе абсорбционной спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, идентификация, абсорбционная спектроскопия, нарушение полного внутреннего отражения, спектры поглощения, искусственная нейронная сеть.

Annotation. We consider the practical issues associated with the use of neural network technology for the processing of spectral measurement data. The features and benefits of the implementation of this technology are investigated when it is used in the detector of traces of explosives and other dangerous substances on objects based on the principle of absorption spectroscopy attenuated total internal reflection.

Keywords: explosives, explosives identification, absorption spectroscopy, attenuated total reflection, absorption spectrum, artificial neural network.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач в проблеме комплексной безопасности является задача своевременного обнаружения взрывчатых веществ (ВВ). Заблаговременное обнаружение и идентификация взрывчатого вещества способствует, в частности, предотвращению террористических актов, которые могут повлечь за собой гибель множества людей. Существует достаточно большое число методов обнаружения ВВ, наиболее полная классификация которых представлена в отчете Национального научно-исследовательского совета США (National Research Council, NRC) «Существующие и потенциальные методы обнаружения взрывчатых веществ», опубликованном в 2004 году [1]. Среди них, например, использование животных, натренированных на поиск взрывчатых веществ, проведение

различного рода досмотров и сканирований подозрительных вещей и лиц с помощью рентгеновских установок, системы обнаружения ВВ на основе ядерных методов, детекторы паров ВВ (газоанализаторы), оптические методы и методы комплексного анализа. Все эти способы хороши, но большинство из них справляется с поставленной задачей только при непосредственном наличии взрывчатого вещества у террориста, а для эффективной борьбы с терроризмом немаловажной является возможность определить наличие ВВ не только в момент досмотра, но и любое взаимодействие с ним ранее по их «отпечаткам» (следам оставленных ВВ).

На сегодняшний день для обнаружения в том числе и «следов» ВВ применяются газоаналитические приборы, основанные на обнаружении паров ВВ при анализе воздушной массы, полученной с расстояния до 5–8 см от объекта исследования либо с применением специальных салфеток для отбора вещества (в зависимости от используемого мето-

© Сорокин А. А., Шепотько А. С., Страхов С. Ю., Стукалова А. С., 2017

да: спектрометрия ионной подвижности или газовая хроматография). Проблемы метода заключаются в большой статистике ложных срабатываний на примесные вещества в случае спектрометрии ионной подвижности, т. к. подвижность ионов является сложной и недостаточно специфичной характеристикой и большой зависимостью от температурных условий, трудностью определения малолетучих ВВ (тен, гексоген, октоген) [2]. Так, понижение температуры окружающей среды на 5 °С приводит к двукратному уменьшению давления насыщенных паров тротила. При способе газовой хроматографии необходимо применение специальной салфетки для отбора, которой необходимо протирать исследуемый объект. Реализация приборов с использованием данного метода более дорогостоящая, но лишена недостатка влияния погодных условий.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВВ

Одним из перспективных методов контактного обнаружения малых количеств (менее 1 мкг) ВВ является абсорбционная спектроскопия [3, 4]. Этот метод основан

на спектрально-селективном (зависящем от длины волны) поглощении света веществом согласно закону Бугера-Ламберта-Бера.

Поскольку все вещества имеют свои оригинальные спектры поглощения, связанные с колебательно-вращательными переходами внутри молекул, следовательно, по спектральному распределению прошедшей через вещество интенсивности излучения можно это вещество идентифицировать. В частности, ВВ имеют инфракрасные (ИК) спектры поглощения, сконцентрированные в диапазоне 5...10 мкм и обусловленные валентными и деформационными колебаниями молекул в их составе [3, 4].

Для практической реализации абсорбционной спектроскопии в задаче обнаружения малых количеств ВВ на различных предметах в [5] предложено использование метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), схема которого представлена на рис. 1. Для реализации метода НПВО необходимо соблюдать условие полного внутреннего отражения, то есть угол падения волны должен превосходить некий критический угол, коэффициент отражения при этом не будет зависеть от длины волны. НПВО – явление, основанное на проникновении световой волны из оптически более плотной

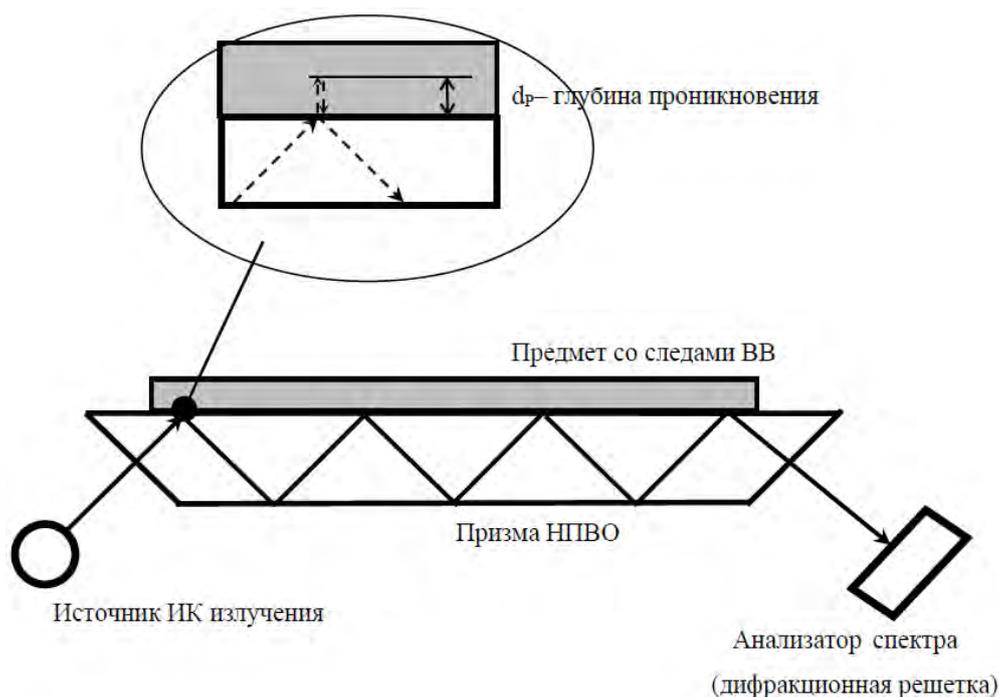


Рис. 1. Схема реализации метода абсорбционной спектроскопии НПВО

среды 1 в менее плотную среду 2 на глубину, соизмеримую с длиной волны излучения d_p . Если среда 2 не поглощает излучение, то нарушение полного внутреннего отражения не происходит, и вся энергия излучения возвращается в среду 1. Если при проходе излучения в среду 2 происходит частичное поглощение света на длинах волн, соответствующих спектру поглощения среды, то возникает эффект НПВО. Таким образом спектр проходящей через призму волны содержит информацию о спектре поглощения среды 2, приложенной к призме. На практике в качестве среды 2 может выступать предмет, проверяемый на наличие на нем ВВ. Теория метода НПВО подробно изложена в [6]. В качестве анализатора спектра может использоваться дифракционная решетка, Фурье-спектрометр или линейный спектральный фильтр.

На сегодняшний день технология абсорбционной спектроскопии с использованием НПВО реализована в серийных приборах НПП «Лазерные системы» (Санкт-Петербург). Выпускаемый детектор следов взрывчатых и опасных веществ предназначен для экспресс-контроля наличия следов ВВ на пальцах рук, документах, других поверхностях, в жидкостях, а также в образцах, которые предположительно являются опасными веществами [3, 7]. В настоящее время ведется работа над исследованием применимости нейросетевого подхода для идентификации

ВВ на основе анализа их спектра, получаемого с помощью данного детектора и автоматизации пополнения базы знаний, что способно существенно упростить жизнь заказчикам, минимизировать работу экспертов и повысить вероятность правильного обнаружения.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВВ

1. Исследовательский прототип нейронной сети

Как известно искусственные нейронные сети (ИНС), являются одним из наиболее мощных инструментов создания интеллектуальных систем, моделирующих базовые механизмы обработки информации, присущие человеческому мозгу. Каждая нейронная сеть имеет свою специфику. Нет общей структуры, которая способна решать различные функциональные задачи. Таким образом для решения поставленной задачи необходимо выбрать наиболее подходящую нейросетевую модель. В результате анализа классификаций нейросетевых моделей по типам связей между нейронами, по методам обучения и по решаемым задачам была выбрана многослойная сеть прямого распространения сигнала, обучаемая методом обратного распространения ошибки [8] (рис. 2).

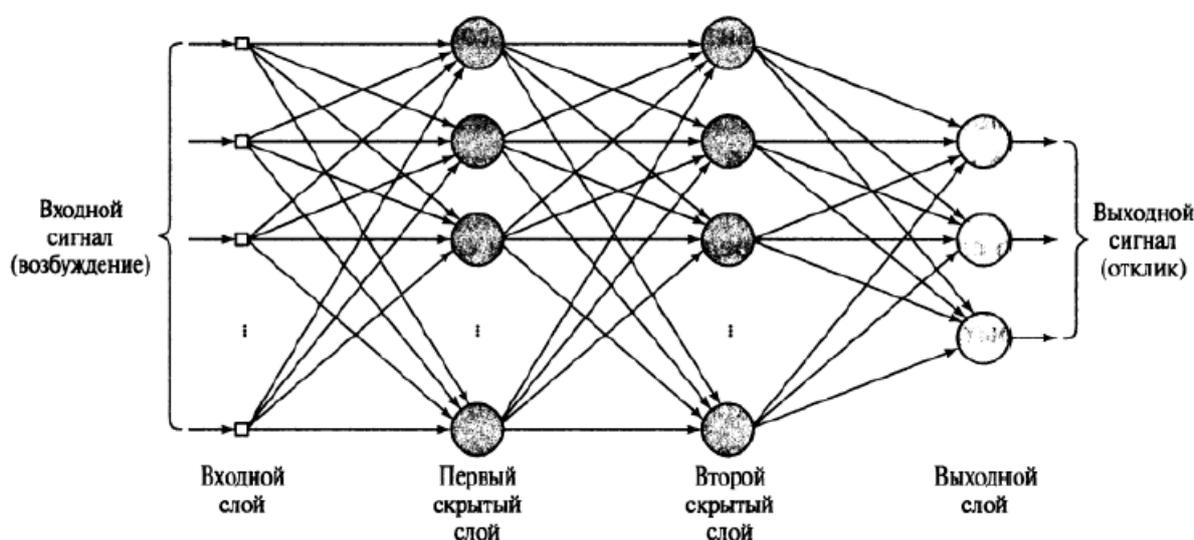


Рис. 2. Структура многослойной сети прямого распространения сигнала

Основные требования, предъявляемые к исследовательскому прототипу:

- возможность обработки спектров сигналов, полученных детектором;
- возможность задания начальных параметров системы;
- возможность обучения ИНС на основе обучающей выборки, определяемой пользователем;
- возможность использования ИНС для идентификации веществ;
- возможность многократного применения обученной ИНС с целью распознавания ВВ.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к разрабатываемому исследовательскому прототипу можно описать его структуру. Она включает в себя 6 основных модулей:

- 1) модуль настройки параметров исследовательского прототипа;
- 2) модуль инициализации ИНС;
- 3) модуль обработки входных данных;
- 4) модуль обучения ИНС;
- 5) модуль принятия решения искусственной нейронной сетью;
- 6) модуль загрузки/сохранения ИНС.

На рис. 3 схематично представлена структура исследовательского прототипа.

2. Выбор параметров численного эксперимента

Для проверки работоспособности предложенного пути решения использовалось 2276 спектров поглощения веществ, полученных детектором. Набор спектров, снятых с каждого ВВ, состоит из спектров целевого вещества на пальце человека (под целевым веществом понимается исследуемый образец в его стандартном виде) и растворов с разной его концентрацией. Набор спектров загрязнителей состоит из спектров целевого вещества на пальце.

Распределение общего количества спектров по веществам:

- 1) Гексоген (взрывчатое вещество), 214 спектров;
- 2) Тротил (взрывчатое вещество), 326 спектров;
- 3) Тэн (взрывчатое вещество), 272 спектра;
- 4) Чистая призма, 529 спектров;
- 5) Чистый палец, 138 спектров;
- 6) Набор спектров веществ-загрязнителей в приведенном количественном соотношении: вазелин – 101 спектр, глицерин – 100 спектров, кофе – 100 спектров, машинное масло – 97 спектров, мыло – 101 спектр, подсолнечное масло – 98 спектров, сахар – 100 спектров, чай – 100 спектров.

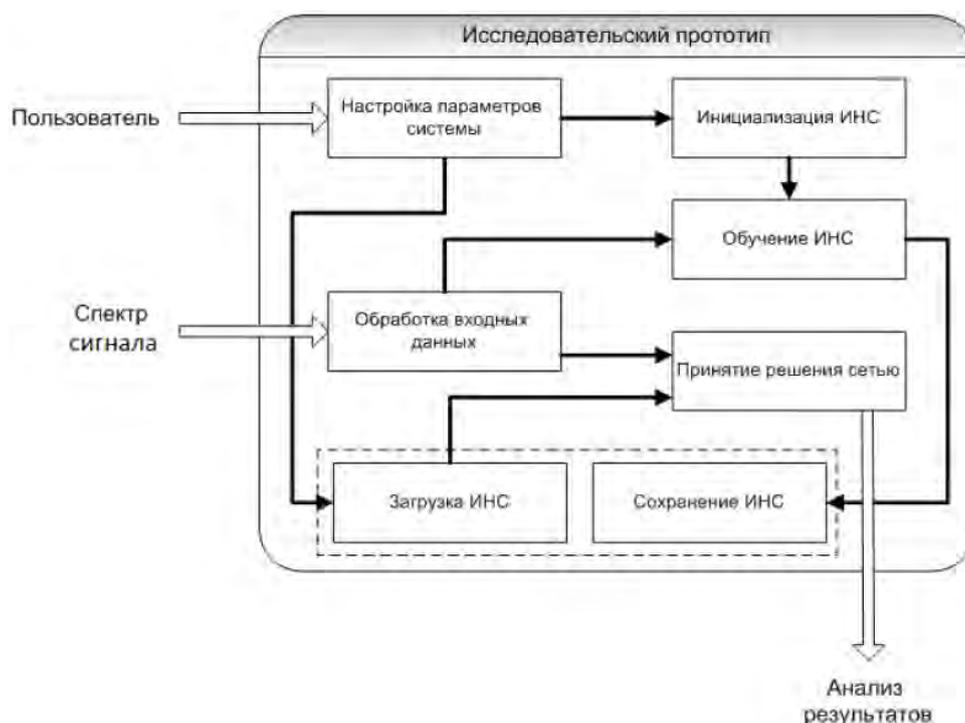


Рис. 3. Структура исследовательского прототипа

Таблица 1
Распределение количества спектров взрывчатых веществ по концентрациям

Конц-ия \ В-во	Гексоген	Тротил	Тен
В-во на пальце	25	26	25
5000 нг	–	50	49
2500 нг	49	50	48
1000 нг	40	55	50
750 нг	–	–	50
500 нг	50	45	50
150 нг	–	100	–

Набор спектров каждого вещества, приведенного выше, состоял из многократно снятых спектров в разные моменты времени при разном производстве целевого вещества.

Согласно достаточно большой статистике отснятых спектров на них повторялись не только характерные признаки самого целевого вещества, но и всех его примесей, специфичных для данного образца [1]. Все остальные пики являлись следствием шумов и других помех.

Для определения границ подаваемых в сеть спектров использовался визуальный поиск характерных пиков взрывчатых веществ на основе достаточно большой статистики отснятых спектров. Таким образом, при обучении сети анализировался не весь исходный спектр, полученный детектором, а только тот диапазон, который включал в себя характерные пики исследуемых ВВ, что позволило обучить сеть более качественно.

1) Характерные пики спектров поглощения гексогена и его примесей расположены между 47 и 80 отсчетами (рис. 4). Каждому отсчёту в детекторе, использующем в качестве спектрального анализатора дифракционную решетку, соответствует определенная длина волны излучения [2].

2) Характерные пики спектров поглощения тротила и его примесей расположены между 40 и 65 отсчетами (рис. 5)

3) Характерные пики спектров поглощения тэна и его примесей расположены между 55 и 80 отсчетами (рис. 6)

3. Методика проведения эксперимента

При проведении экспериментальной проверки работоспособности прототипа использовались разные наборы обучающих и тестовых выборок. Под обучающей выборкой в данном случае понимается набор спектров веществ, которые предназначены для обучения сети, а под тестовой выборкой – равновероятная случайная выборка спектров веществ из первоначальной обучающей выборки, которые не участвуют в обучении сети и предназначены для проверки ИНС на наличие свойства обобщения (тестовая выборка составляет не более 30 % от первоначальной обучающей выборки) [3].

Основной упор делался на определение количества выходных нейронов сети и их назначение. В результате были выбраны и исследованы три архитектуры:

1. Количество нейронных сетей – 1. Количество выходов ИНС – 2 выхода. Первый вы-

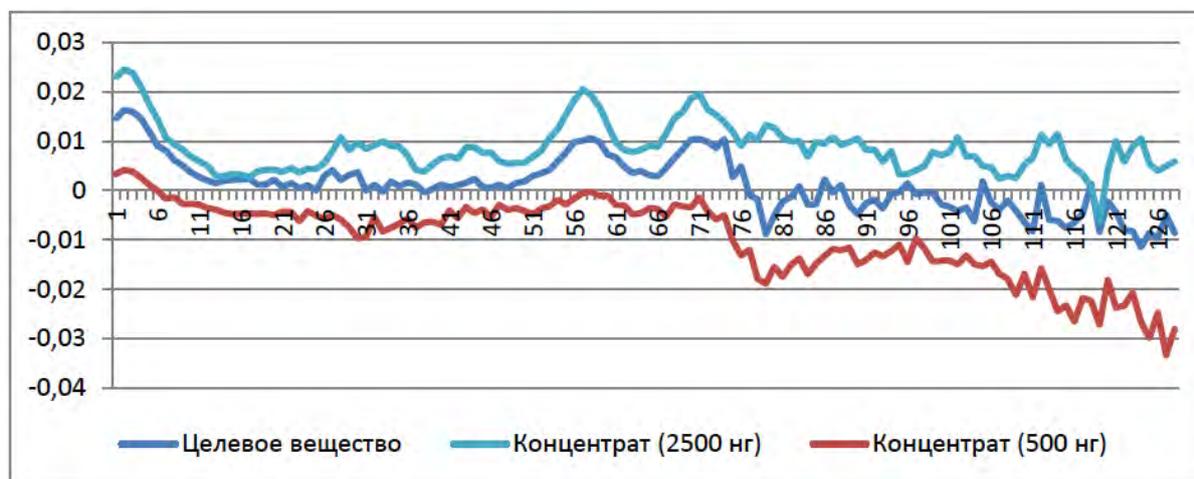


Рис. 4. Характерные спектры поглощения гексогена

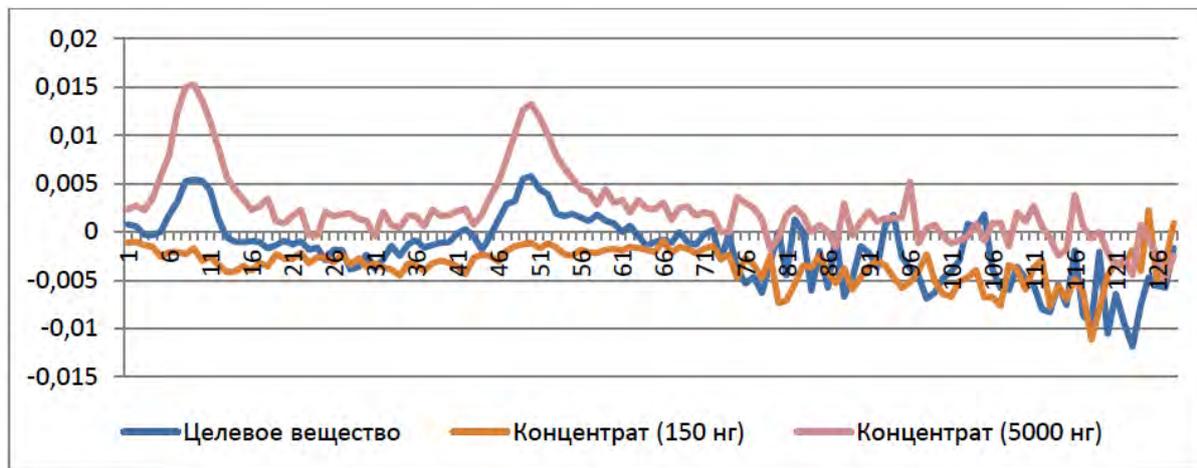


Рис. 5. Характерные спектры поглощения тротила

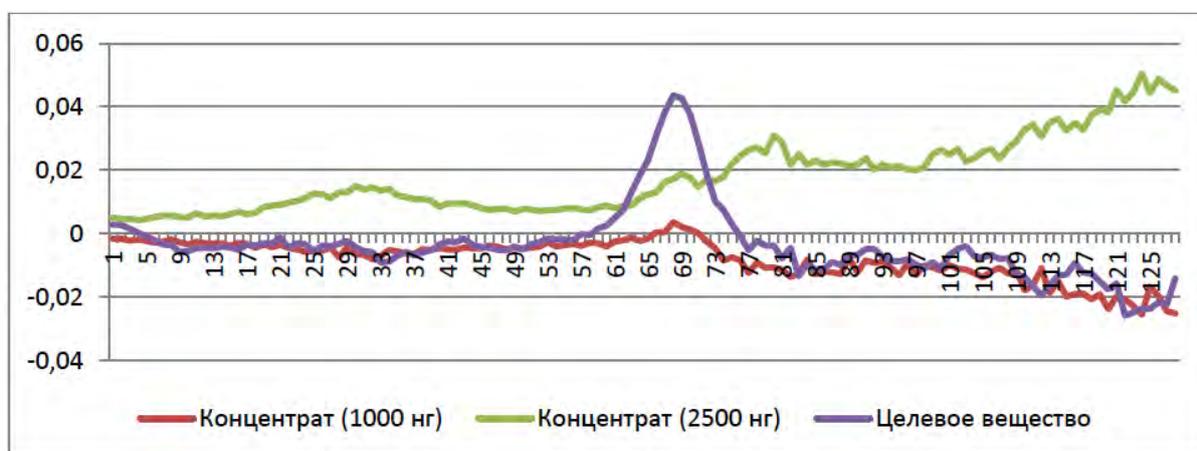


Рис. 6. Характерные спектры поглощения тэна

Таблица 2

Сравнительная таблица результатов обучения трех архитектур нейросети

Номер архитектуры	Ошибка обучения	Количество эпох обучения
1	0.0001754	5201
2	0.000133	3827
3	Гексоген	0.000075
	Тротил	0.0000999
	Тэн	0.000098

ход соответствует взрывчатому веществу (без определения конкретного вида ВВ), второй – невзрывчатому.

2. Количество нейронных сетей – 1. Количество выходов ИНС – 4 выхода. Первый выход соответствует взрывчатому веществу гексоген, второй – взрывчатому веществу тэн, третий – взрывчатому веществу тротил, четвертый – невзрывчатому веществу.

3. Количество нейронных сетей – 3 (соответствует количеству исследуемых видов ВВ).

Каждая ИНС предназначена для идентификации только одного определенного взрывчатого вещества, на распознавание которого она обучена. Количество выходов каждой ИНС – 2 выхода. Первый выход соответствует определенному виду ВВ для идентификации которого обучена ИНС, а второй – веществу, которое не относится к базовому взрывчатому веществу.

На каждую архитектуру приходилось по меньшей мере 50 экспериментов с разными

Таблица 3

Сводная таблица результатов идентификации веществ

Вещество	Исследуемых спектров, шт.	ИНС для идентификации определенного ВВ	Ожидаемый результат, № нейрона	Распознанных спектров, шт. (%)
Гексоген (тестовый набор)	49	Гексоген	1	48 (97.96 %)
		Тротил	2	49 (100.00 %)
		Тэн	2	49 (100.00 %)
Тротил (тестовый набор)	59	Гексоген	2	59 (100.00 %)
		Тротил	1	56 (94.92 %)
		Тэн	2	59 (100.00 %)
Тэн (тестовый набор)	49	Гексоген	2	49 (100.00 %)
		Тротил	2	49 (100.00 %)
		Тэн	1	46 (93.88 %)
Вещества-загрязнители	797	Гексоген	2	797 (100.00 %)
		Тротил	2	795 (99.75 %)
		Тэн	2	795 (99.75 %)

входными параметрами и различным набором обучающей выборки. Целью всех экспериментов в рамках каждой архитектуры являлось определение возможности обучения ИНС для успешного распознавания веществ. Некоторые итоги результатов обучения приведены в табл. 2.

4. Результаты эксперимента

В процессе эксперимента были установлены следующие особенности рассмотренных модификаций:

1. Архитектура № 1:

- низкий процент идентификации определенных веществ;
- широкий диапазон поиска характерных пиков взрывчатых веществ;
- при добавлении нового вещества в базу знаний необходимо заново переобучить всю сеть;
- малое количество выходов сети, что делает обучение сети менее эффективным и идентификацию веществ менее информативной.

Таким образом, результаты эксперимента показывают возможность обучить ИНС идентификации веществ на основе анализа их спектра, при этом обученная ИНС обладает свойством обобщения.

2. Архитектура № 2:

- относительно небольшой процент идентификации мыла на основе распознавания спектров;
- широкий диапазон поиска характерных пиков взрывчатых веществ;
- при добавлении нового вещества в базу знаний необходимо заново переобучить всю сеть;

Результаты эксперимента значительно улучшили показатели идентификации веществ на основе анализа их спектров и устранили некоторые недостатки архитектуры № 1.

3. Архитектура № 3:

- Недостатком эксперимента является более длительный процесс идентификации вещества, т. к. исследуемый спектр необходимо подать на все существующие сети, предназначенные для распознавания ВВ (в данном случае 3 ИНС).

Все основные недостатки, выявленные в первых двух экспериментах, отсутствуют в эксперименте № 3.

В итоге, наиболее высокие показатели идентификации ВВ на основе анализа их спектров были показаны в экспериментах архитектуры № 3. Обобщенные результаты идентификации веществ (архитектура № 3) представлены в табл. 3.

Основным плюсом данной архитектуры так же являлось удобное пополнение базы знаний о веществах, которое заключалось в создании новой нейронной сети для идентификации нового вещества без переобучения существующих ИНС (если в этом нет необходимости).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по работе:

1) Показано, что нейросетевой подход эффективно применим для рассматриваемой предметной области (идентификация веществ на основе анализа их спектров поглощения).

2) Экспериментально доказана работоспособность синтезированных алгоритмов и подтверждена корректность выбранного пути решения.

3) Нейросетевой подход к идентификации веществ, в том числе ВВ, на основе анализа их спектров поглощения не только превосходит по показателям распознавания алгоритмы идентификации серийно выпускаемого детектора (опирающегося на корреляционный и регрессионный анализ спектров [7]), но существенно упрощает пополнение базы знаний о веществах, что облегчает технологию «обучения» прибора обнаружению новых веществ.

Авторы статьи выражают благодарность руководству и сотрудникам НПП «Лазерные системы» за предоставленные данные, полезные обсуждения и практические советы по выполнению данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Existing and Potential Standoff Explosive Detection Techniques. // National Academies Press, 2004. – 144 p.

2. Кихтенко А. В., Елисеев К. В. Обнаружение взрывоопасных объектов: аппаратное обеспечение антитеррористических служб / А. В. Кихтенко. – Режим доступа: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=936&lvl=02.01.01.02>.

3. Борейшо А. А., Страхов С. Ю., Коновалов К. А., Романов А. Ю., Дружинин С. Л., Перхина Е. В. Практическая реализация технологии абсорбционной спектроскопии в приборе для обнаружения следовых количеств взрывчатых веществ на предметах // Специальная техника. – 2009. – № 2. – С. 10–14.

4. Страхов С. Ю. Перспективы развития оптических средств обнаружения следовых количеств взрывчатых веществ / С. Ю. Страхов // Специальная техника. – 2009. – № 1. – С. 2–10.

5. Bertseva Elena V., Savin Andrey V. Explosives trace detection in the process of biometrical fingerprint identification for access control // Proceedings SPIE Vol. 6594, 2007

6. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения. – М.: Мир, 1970. – 336 с.

7. Интернет ресурс: www.lsystems.ru

8. Толмачев С. Г. Системы искусственного интеллекта. Нейросетевые модели: учебное пособие / С. Г. Толмачев; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2011. – 132 с.

Сорокин А. А. – канд. техн. наук, профессор кафедры «Радиоэлектронных систем управления», факультет «Информационные и управляющие системы», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.
E-mail: an_sor@mail.ru

Шепотько А. С. – аспирант кафедры «Радиоэлектронных систем управления», факультет «Информационные и управляющие системы», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.
E-mail: shepotko.anton@gmail.com

Страхов С. Ю. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронных систем управления», факультет «Информационные и управляющие системы», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.
E-mail: strakhov_s@mail.ru

Стукалова А. С. – старший преподаватель кафедры «Радиоэлектронных систем управления», факультет «Информационные и управляющие системы», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.
E-mail: astukalova@mail.ru

Sorokin A. A. – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Electronic control systems, Information and control systems Faculty, Baltic state technical university «VOENMEH».
E-mail: an_sor@mail.ru

Shepotko A. S. – 1th year postgraduate student, Department of Electronic control systems, Information and control systems Faculty, Baltic state technical university «VOENMEH».
E-mail: shepotko.anton@gmail.com

Strakhov S. U. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electronic control systems, Information and control systems Faculty, Baltic state technical university «VOENMEH».
E-mail: strakhov_s@mail.ru

Stukalova A. S. – senior lecturer, Department of Electronic control systems, Information and control systems Faculty, Baltic state technical university «VOENMEH».
E-mail: astukalova@mail.ru