

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СЛЕДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А.А. Павленко, Е.В. Максименко, Л.В. Чернышова, А.В. Диденко

В статье рассмотрен способ теоретического и экспериментального определения предела обнаружения измерительного комплекса дистанционного обнаружения следовых количеств взрывчатых веществ, разработанного на основе метода активного формирования спектральных изображений. Расчет проводился на примере октогена. Найдена зависимость массы искомого вещества от расстояния обнаружения. Рассчитана минимально обнаруживаемая поверхностная концентрация октогена.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, чувствительность комплекса, поверхностная концентрация.

ВВЕДЕНИЕ

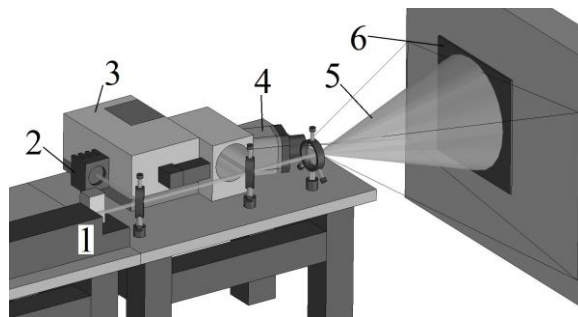
Одним из перспективных направлений обеспечения безопасности и предотвращения террористических актов является создание систем нового поколения для дистанционного бесконтактного обнаружения взрывчатых веществ (ВВ) и взрывных устройств. Основным фактором позволяющим обнаружить ВВ является наличие следовых количеств ВВ на различных поверхностях (багаж, одежда, транспортное средство и т.п.).

Разработка детектора ВВ на основе метода активного формирования спектральных изображений (АФСИ) позволит дополнить имеющиеся средства обнаружения ВВ новым инструментом, что позволит повысить достоверность информации о выявлении террористических угроз.

На первом этапе практической реализации АФСИ был разработан измерительный комплекс для дистанционного обнаружения ВВ в ИК области [1]. 3D модель обследования поверхности разработанным измерительным комплексом представлена на рисунке 1.

Излучение перестраиваемого CO₂-лазера LCD-5WGT разделяется светоделительными пластинами для измерения мощности излучения (P) и длины волны (λ). Далее излучение рассеивается оптическим элементом с углом раскрытия (α) 30° и подсвечивает исследуемый объект со следами ВВ на поверхности. Рассеянное от поверхности излучение регистрируется при помощи ИК неохлаждаемого микролометрического приёмника Xenics Gobi-384. В результате сканирования по всему набору длин волн лазера автоматически формируется набор спектральных данных (гиперкуб), при обработке которого выдается

заключение о наличии следов ВВ на исследуемой поверхности.



1 – CO₂-лазер; 2 – измеритель мощности;
3 – ИК фурье-спектрометр; 4 – ИК приемник;
5 – лазерное излучение; 6 – исследуемая
поверхность

Рисунок 1 – 3D модель обследования поверхности разработанным измерительным комплексом

Проведённые экспериментальные исследования показали возможность применения данного метода для дистанционного обнаружения следовых количеств ВВ [2, 3]. В дальнейшем необходимо определить метрологические характеристики измерительной установки в задачах дистанционного зондирования. Одним из основных метрологических параметров, определяющим применимость системы обнаружения в реальных условиях, является нижний предел обнаружения (порог чувствительности) комплекса. Порог чувствительности измерительного комплекса дистанционного обнаружения ВВ – это минимальная поверхностная концентрация ВВ, при взаимодействии лазерного излучения с которой возникает отклик в виде диффузно-

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СЛЕДОВ ВЗРЫВАТЫХ ВЕЩЕСТВ

рассеянного излучения, достаточный для регистрации и извлечения из него информации о наличии или отсутствии следов искомого вещества.

Целью данной работы является теоретическое определение и экспериментальная проверка порога чувствительности ранее разработанного измерительного комплекса дистанционного обнаружения следовых количеств ВВ на поверхности тел.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Минимально определяемая масса вещества зависит от конкретного метода обнаружения ВВ, дистанции обнаружения, параметров лазерного излучения (мощность и энергия излучения, длина волны, длительность импульса), шумов в измерительном тракте, алгоритмов обработки и анализа зарегистрированных данных.

В рассматриваемом методе приёмником измерительной информации является микроболометрическая матрица. При этом зарегистрированное значение интенсивности каждого отдельного пикселя матрицы характеризует взаимодействие лазерного излучения с веществом в определённой области пространства.

Уверенное обнаружение и идентификация вещества измерительным комплексом возможны в случае, если вещество полностью занимает не менее одного пикселя зарегистрированного изображения (рисунок 2а). Геометрические размеры области пространства, проецируемые в пиксель, зависят от характеристик выбранной оптической системы микроболометрической камеры и расстояния регистрации (рисунок 2б).

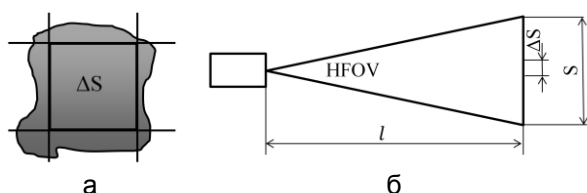


Рисунок 2 – Расчет минимального размера искомого вещества

Ширина или высота поля обзора S определяется по формуле (1):

$$S = 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}(FOV / 2), \quad (1)$$

где l – расстояние от камеры до объекта, FOV – угол поля зрения камеры. Поле зрения разбивается на горизонтальную и вертикаль-

ную составляющие, обозначаемые HFOV (S_H) и VFOV (S_V) соответственно.

Минимальная площадь обнаруживаемого объекта на расстоянии l (2):

$$\Delta S = S_H \cdot S_V / a \cdot b, \quad (2)$$

где a – количество пикселей матрицы по горизонтали, b – количество пикселей матрицы по вертикали.

Поглощение излучения слоем вещества зависит от вида, толщины слоя и поверхностной концентрации поглощающего вещества.

Минимальная толщина слоя вещества на поверхности определяется размером частиц искомого вещества.

Объем и масса искомого вещества на единичной площади определяется по формулам (3) и (4) соответственно:

$$V = \Delta S \cdot h, \quad (3)$$

где h – толщина слоя.

$$m = V \cdot \rho, \quad (4)$$

где ρ – плотность.

Отсюда можно определить нижний предел поверхностной концентрации вещества N ($\text{г}/\text{см}^2$):

$$N = \frac{m}{\Delta S}. \quad (5)$$

Наличие в этой области помимо детектируемого ВВ посторонних веществ, вносит искажения в регистрируемую интенсивность пикселя, что в дальнейшем может привести к пропуску обнаружения фактического наличия вещества.

В случае если вещество не полностью покрывает пространственную область пикселя, регистрируемый сигнал содержит как характеристику взаимодействия излучения с веществом, так и с подложкой, на которую это вещество нанесено.

При сканировании пикселя по спектральному диапазону будет зарегистрирована сумма спектров вещества и подложки, в которой вклад каждого спектра пропорционален занимаемой веществом (или подложкой) площадью в пределах пикселя.

В случае, если спектр подложки не имеет выраженных особенностей в спектральной области исследований, будет зарегистрирован спектр вещества с уменьшенной в k раз амплитудой между максимумами и минимумами,

$$k = \frac{\Delta S}{S_m}, \quad (6)$$

где ΔS – площадь объекта, приходящаяся на один пикселя, S_m – площадь, занимаемая

веществом в пределах приходящейся на один пиксель площади объекта.

Для конкретной системы регистрации может быть максимальное значение k , при которой вещество может быть идентифицировано по зарегистрированному спектру.

$$k_{MAX} = \frac{I_{MAX}}{2 \cdot SNR \cdot P_{CAM}}, \quad (7)$$

где k_{MAX} – максимальное значение отношения площадей, I_{MAX} – максимальное возможное значение регистрируемого пикселя, SNR – отношение сигнал/шум, P_{CAM} – амплитуда размаха собственных шумов детектора.

Отсюда определяется минимально обнаруживаемая поверхностная концентрация:

$$N_{MIN} = \frac{N}{k_{MAX}}. \quad (8)$$

РАСЧЁТ МИНИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ИСКОМОГО ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Определим теоретический предел чувствительности для разработанного измерительного комплекса.

Основные технические характеристики используемой для регистрации камеры Gobi-384 фирмы Xenics представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики камеры Gobi-384

| Параметр | Значение |
|---|--|
| Спектральный диапазон | 8–14 мкм |
| Разрешение, пикселей | 384x288 (шаг 25 мкм) |
| Фокусное расстояние (f) и углы обзора (FOV) | 18 мм $f/1$, HFOV 25.5°, VFOV 19.1° |
| Частота кадров | 50 Гц |
| Чувствительность | 0,08 °C при 30 °C |

По формуле (2) была найдена минимальная площадь обнаруживаемого объекта на расстоянии l , и построена зависимость площади искомого вещества от расстояния обнаружения (рисунок 3).

В работе [4] было выявлено, что наиболее оптимальным ВВ для обнаружения методом АФСИ является октоген (НМХ) для всех рассмотренных материалов подложек. Основным критерием успешного дистанционно-

го обнаружения ВВ является существенное отличие спектров поглощения ВВ и материала подложки в исследуемой области. Соответственно при анализе поверхности с данными ВВ экспериментальная установка будет иметь самую высокую чувствительность.

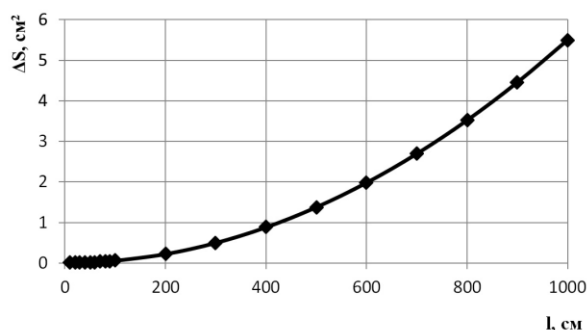


Рисунок 3 – Зависимость размера искомого вещества от расстояния обнаружения

В качестве примера был выбран октоген промышленного производства. Плотность октогена составляет 1,91 г/см³. С помощью анализатора размеров частиц Malvern Spratec с диапазоном измерения от 0,1 до 1000 мкм был проведен анализ выбранного ВВ. Гистограмма распределения частиц по размерам приведена на рисунке 4.

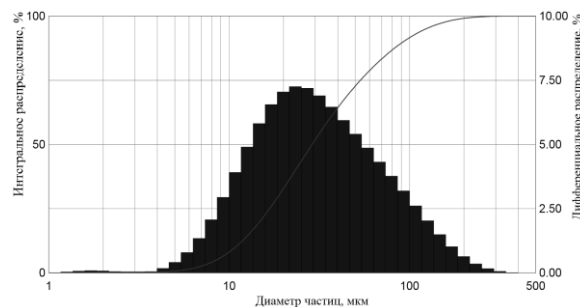


Рисунок 4 – Распределение частиц по размерам

Средний диаметр частиц октогена составил 28 мкм. Поверхностная концентрация октогена при 100 % заполнении поверхности в виде монослоя составляет 5,3 мг/см².

Зависимость приходящейся на один пиксель массы монослоя октогена со 100 % заполнением от расстояния обнаружения представлена на рисунке 5.

В определение чувствительности измерительного комплекса долю погрешности вносит наличие собственных шумов микроболометрической камеры. Для определения вносимой погрешности было последовательно зарегистрировано 20 изображений с закрытым объективом камеры. Далее было вычислено СКО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СЛЕДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

значений яркости пикселей для каждого изображения и произведено усреднение полученного массива изображений. Размах собственных шумов камеры составил 300 единиц.

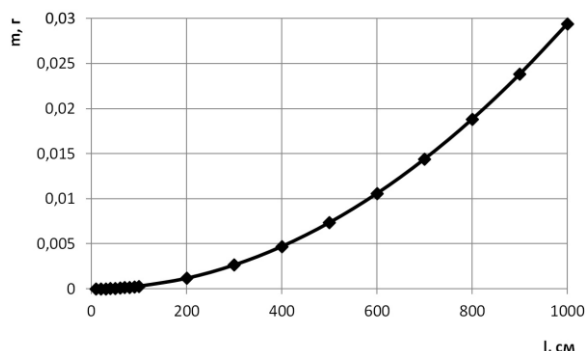


Рисунок 5 – Зависимость изменения массы октогена от расстояния обнаружения

Максимальное возможное значение регистрируемого пикселя для данной камеры составляет 65535 единиц.

Задаваясь отношением сигнал/шум можно получить зависимость минимально обнаруживаемой поверхностной концентрации вещества (рисунок 6).

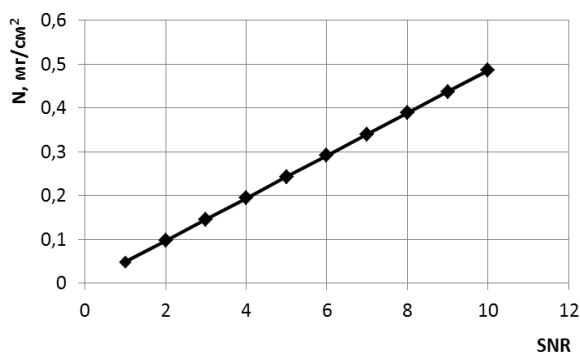


Рисунок 6 – Зависимость минимально обнаруживаемой концентрации вещества от отношения сигнал/шум

Принимая значение $SNR = 10$ для надёжного обнаружения сигнала в шумах можно определить минимальную обнаруживаемую поверхностную концентрацию $N_{MIN} = 0,48 \text{ мг/см}^2$. При уменьшении собственных шумов измерительного тракта, это значение может быть существенно снижено.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Предел обнаружения исследовался на следах октогена. Образцы на стеклянной подложке с разной поверхностной концентрацией с шагом 10 мкл были получены микро-

пипетированием. Внешний вид образца представлен на рисунке 7. Поверхностная концентрация следов октогена составила 0,7 и 0,8 мг/см². Образец располагался на расстоянии 0,4 м от ИК приёмника.

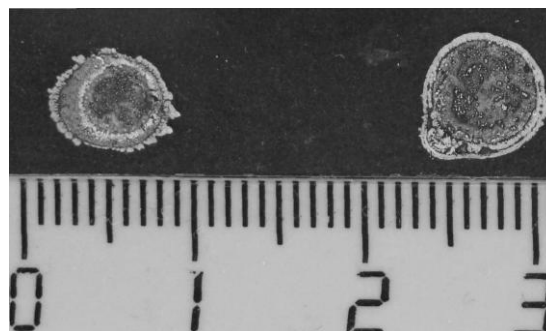


Рисунок 7 – Внешний вид образца октогена на стеклянной подложке

Обработка и анализ проводился двумя цельнопиксельными методами – методом спектрального угла и методом минимального расстояния. Результаты анализа представлены на рисунках 8 и 9. Белым цветом обозначены области обнаруженного вещества.



Рисунок 8 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений методом минимального расстояния



Рисунок 9 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений методом спектрального угла

По результатам экспериментальных исследований была определена минимальная обнаруживаемая поверхностная концентрация. Для каждого метода концентрация составила 0,8 мг/см².

ВЫВОДЫ

Проведено теоретическое и экспериментальное определение предела обнаружения измерительного комплекса дистанционного обнаружения следовых количеств ВВ.

Достигнутая к настоящему времени наименьшая экспериментально идентифицируемая концентрация октогена составила 0,8 мг/см².

Предел обнаружения может быть снижен при использовании камеры с более высоким разрешением, использовании более длиннофокусного объектива, снижения шумов камеры за счёт охлаждения, снижения шумов лазера и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павленко, А. А. Дистанционное обнаружение следов октогена методом активного формирования спектральных изображений с использованием перестраиваемого СО₂-лазера / А. А. Павленко, Е. В. Максименко, Л. В. Чернышова // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 4. – С. 383–386.

2. Скворцов, Л. А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел / Л. А. Скворцов. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 208 с.

3. Maksimenko E. V., Chernyshova L. V. Didenko A. V. Applying of Methods of Processing of Hyperspectral Data for Identification of Traces of Explosives, 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference Proceedings, Novosibirsk State Technical University, IEEE, 2016, pp. 358-363.

4. Максименко, Е. В. Оценка эффективности дистанционного обнаружения следов взрывчатых веществ методом активного формирования спектральных изображений с использованием перестраиваемого СО₂-лазера / Е. В. Максименко // Известия Вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 5. – С. 26–31.

Павленко Анатолий Александрович, д.ф.-м.н., зав. лабораторией, ИПХЭТ СО РАН, e-mail: ipcet@mail.ru.

Максименко Евгений Валерьевич, к.ф.-м.н., с.н.с., ИПХЭТ СО РАН, e-mail: eugene.maksimenko@yandex.ru.

Чернышова Людмила Владимировна, аспирант, м.н.с., ИПХЭТ СО РАН, e-mail: lvchernyshova@bk.ru.

Диденко Александр Валерьянович, ведущий инженер, ИПХЭТ СО РАН. e-mail: dalexwork@gmail.com.