



УДК [355.404.7.11:543.422.3-74]:623.746
ГРНТИ 78.25.12.35

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАССИВНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ ПРИ ВЕДЕНИИ ВОЗДУШНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

*Э.Н. БАКИН, кандидат военных наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В.И. КОПАЕВ

ВА РХБЗ имени маршала С.К. Тимошенко (г. Кострома)

Р.А. КОЧЕТОВ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Д.А. ЧЕРВАНЬ, кандидат технических наук, доцент

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье предложено применение метода пассивной инфракрасной спектроскопии для получения объективных данных о химической обстановке без посадки и останова двигателя вертолета. Описана возможность применения способов обнаружения и идентификации химических веществ во вторичном облаке, а также низколетучих химических веществ Фурье-спектрометрами при ведении воздушной химической разведки местности. Приведены экспериментально полученные характеристики воздушного потока от несущего винта вертолета, используемого для образования градиента концентрации во вторичном облаке токсических химикатов и аварийно-химических отравляющих веществ. Описаны условия образования паров веществами с низкой фугитивностью под воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты.

Ключевые слова: воздушная химическая разведка местности, пассивная инфракрасная спектроскопия, тепловая энергия электромагнитного поля, низкая фугитивность, градиент концентрации вторичного облака.

PARTICULARITIES OF THE PASSIVE INFRARED SPECTROMETERS USE AT CONDUCTING OF AERIAL CHEMICAL RECONNAISSANCE

*E.N. BAKIN, Candidate of Military sciences, Associate Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

V.I. KOPAEV

Marshal S.K. Timoshenko Nuclear, Chemical and Biological Protection Military Academy (Kostroma)

R.A. KOCHETOV

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

D.A. CHERVAN', Candidate of Technical sciences, Associate Professor

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

The article suggests the use of the passive infrared spectrometry method to obtain objective data on the chemical situation without landing and stopping the helicopter engine. The possibility of using methods for detecting and identifying chemicals in the secondary cloud, as well as low – volatile chemicals, by Fourier spectrometers in conducting aerial chemical reconnaissance of the area is described. The experimental characteristics of the air flow from the helicopter main rotor used for the formation of a concentration gradient in the secondary cloud of toxic chemicals and emergency chemical toxic substances are presented. The conditions for the formation of vapors by substances with low fugitiveness under the influence of an ultrahigh frequency electromagnetic field are described.



Keywords: aerial chemical reconnaissance, passive infrared spectrometry, thermal energy of the electromagnetic field, low fugitiveness, concentration gradient of the secondary cloud.

Введение. Анализ современных вооруженных конфликтов показывает, что требуется реальная коррекция теории и практики ведения военных действий, поскольку велика вероятность использования оружия массового поражения в локальном или глобальном масштабе. Загрязнение атмосферы и местности химическими веществами при определенных допущениях можно рассматривать как вариант с применением химического оружия или аварией с распространением аварийных химических опасных веществ (АХОВ). Следовательно, необходим постоянный мониторинг за концентрацией химических веществ в атмосфере и на местности.

Современный уровень развития технических средств сбора и обработки информации на всех уровнях управления войсками становится более автоматизированным, поскольку требования ко времени оперативной обработки данных ужесточаются, в том числе, когда речь идет об анализе радиационной, химической и биологической обстановки в реальном времени. На современных авиационных средствах устанавливают измеритель ИМД-31 и ИМД-32 [1] с техническими характеристиками, позволяющими оперативно и достоверно получать информацию о радиационной обстановке. Выявление химической обстановки воздушными средствами вызывает большую проблему, прежде всего с точки зрения химических и физических свойств отравляющих и аварийно-химических веществ.

Выявление и оценка химической обстановки с помощью воздушных средств, в том числе БпЛА, являются актуальной задачей, поскольку может обеспечить передачу данных на наземные пункты управления о текущей ситуации в заданном районе и практически без ограничений по времени работы над зараженной поверхностью. Таким образом, использование воздушных средств разведки позволит получить достаточно полную картину о наличии химических веществ в атмосфере и на поверхности, их концентрации и типе химических веществ, а также оценить масштабы химического заражения в воздухе и на поверхности.

На сегодняшний день существует широкий выбор методов (датчиков) обнаружения и идентификации отравляющих веществ (токсичных химикатов), находящихся в парообразном состоянии (хромато-масс-спектрометры, спектрометры ионной подвижности, индикаторные на основе цветных химических реакций, волоконно-оптические, электрохимические, акустико-волновые и иммунохимические). Однако на современном этапе ни один из известных датчиков не отвечает основным требованиям.

К основным недостаткам можно отнести низкую избирательность, большие массогабаритные размеры, и все они предназначены в основном для контроля воздушного пространства, в то время как большинство отравляющих веществ тяжелее воздуха и концентрируются на поверхности земли. Поэтому возникает проблема поиска очагов заражения и идентификации отравляющих веществ, оседающих на поверхностях (грунт, дорожное покрытие, аэродромные плиты) в виде аэрозоля или в капельножидком состоянии. При этом требуется создать надёжные и экономически эффективные датчики дистанционного контроля заражения отравляющими веществами (токсичными химикатами).

Одним из направлений работы по решению вышеуказанной проблемы является разработка комплексов, способных вести воздушную химическую разведку с использованием методов спектрального анализа, что в режиме реального времени обеспечит органы военного управления достоверной и точной информацией о районах химического заражения и типах отравляющих веществ в необходимом объеме.

Спектрометрия ещё со времён И. Ньютона стала основным и наиболее информативным методом, позволяющим исследовать состав вещества. Разработка авиационных комплексов, в том числе и беспилотных, способных производить регистрацию и идентификацию отравляющих веществ с воздуха, позволит создать эффективную систему воздушной химической разведки.



Актуальность. В состав бортового комплекса МИ-24р входят газосигнализатор ГСА-12 и прибор радиационной химической разведки ПРХР для решения задач обнаружения радиационного и химического заражения воздуха. Обработка данных с этих приборов осуществляется только после посадки вертолета. Устранение данного недостатка возможно при использовании информации о спектре поглощения паров химических веществ. При наличии базы данных о спектрах типовых химических веществ и формировании текущего спектра находится коэффициент корреляции, максимальное значение которого указывает на соответствующую идентификацию. Данный метод является оптимальным направлением исследований по решению данной задачи.

В современных технических приборах при формировании измерений делается допущение, что со временем концентрация паров изменяется [2]:

$$\text{grad}C = \frac{dC}{dt} \neq 0, \quad (1)$$

где $\text{grad} C$ – градиент концентрации паров токсичных химикатов (ТХ) и АХОВ в зоне обнаружения прибора; dC – концентрация паров ТХ и АХОВ в зоне обнаружения прибора для двух моментов времени (t_1 и t_2); $dt = (t_2 - t_1)$ – время замера прибора.

Данное допущение справедливо для химических веществ, находящихся в парогазовом состоянии, при этом время действия ограничено, например, после применения токсичных веществ оно длится минуты, а при авариях с АХОВ – десятки минут.

В последние годы в связи с совершенствованием элементной базы, методов Фурье-спектроскопии стали разрабатываться пассивные инфракрасные радиометры, обеспечивающие дистанционное обнаружение облаков широкого перечня ТХ и АХОВ с высокой достоверностью на фоне различных типов подстилающей поверхности. Одной из главных задач при создании газосигнализаторов на основе метода пассивной инфракрасной локации, является разработка мощного программно-математического обеспечения на основе теории распознавания образцов и методов корреляционного анализа. Высокое разрешение Фурье-спектрометров [3] позволяет регистрировать практически без искажений спектры любых веществ, при этом имеется возможность одновременной регистрации нескольких десятков компонентов, с отдельным определением их концентрации, но только переведённых в газовую фазу. Одним из существенных недостатков Фурье-спектрометров является низкая идентификация веществ, которые концентрируются в основном в приземном слое, а также с веществами находящимися в аэрозольном состоянии.

Возможным решением данной задачи является перевод химического вещества в парообразное состояние, формирование градиента концентрации паров и его идентифицирование. На данный момент, на наш взгляд, идентификацию целесообразно проводить ионизационным методом. В качестве технической реализации данного метода наиболее целесообразно использовать трехэлектродную резонансную ионизационную камеру. Эта конструкция позволяет значительно повысить метрологические характеристики ионизационного метода, в частности специфичность.

На рисунке 1 показана типовая ситуация для идентификации химических веществ, где C_1 – концентрация паров идентифицируемого вещества на высоте H , C_2 – концентрация паров идентифицируемого вещества в приземном слое (на высоте 1 метр от поверхности), при этом $C_1 \ll C_2$.

В соответствии с законами неразрывности и аэродинамики работа винта вертолётá приводит к тому, что отбрасываемая вниз под вертолёт масса воздуха создаёт турбулентный спутный след и имеет тип мощного узконаправленного струйного течения, создавая при этом нисходящие воздушные потоки. Так как скорость воздушного потока от несущего винта



вертолета значительно меньше скорости звука, данный воздушный поток будет описываться законом Бернулли для несжимаемых газовых сред [4].

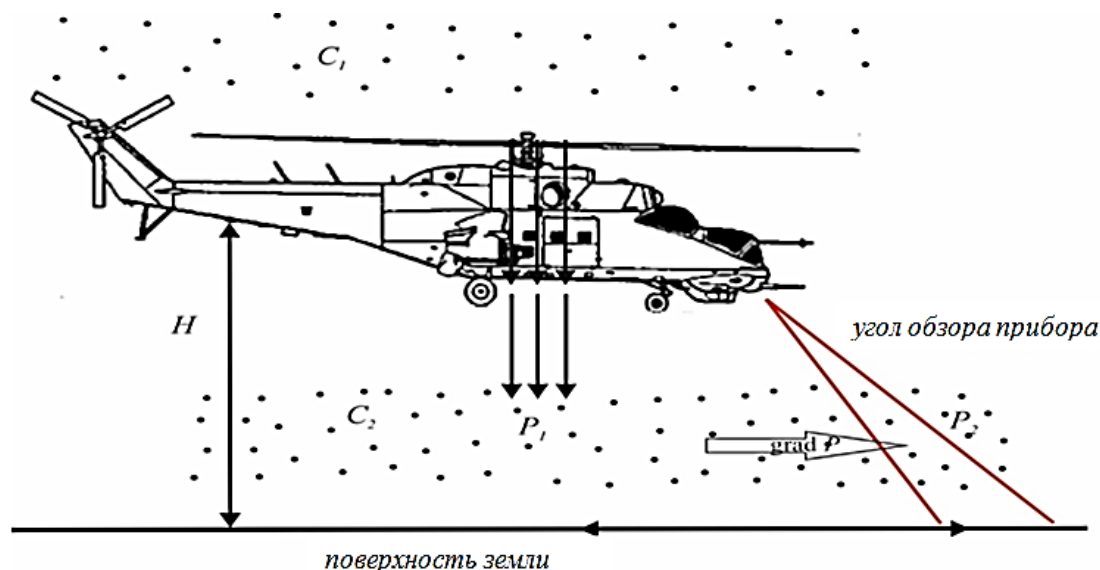


Рисунок 1 – Влияние вращения несущего винта Ми-24р на формирование концентрации паров химических веществ в приземном слое

С учетом того, что векторы статического и динамического давления в данной системе одинаково направлены, суммарное давление в воздушном потоке у поверхности земли будет составлять:

$$P_1 = P + 0,0625v^2, \quad (2)$$

где P_1 – суммарное давление в воздушном потоке у поверхности земли; P – статическое (атмосферное) давление; v – скорость воздушного потока.

Таким образом, при условии, что скорость воздушного потока не равна нулю, давление в потоке P_1 будет выше, чем давление за его пределами P_2 . Это будет вызывать образование барического градиента, направленного по нормали к изобарической поверхности.

По направлению вектора барического градиента образуется сила барического градиента, она отнесена к массе и численно выражает ускорение, приданное единице массы воздуха [5].

$$G = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dn}, \quad (3)$$

где G – сила барического градиента; n – единичный вектор.

Высотный градиент характеризует степень изменения давления сплошной среды в пространстве от высоты, вектор, направленный перпендикулярно к изобарической поверхности в сторону уменьшения давления P на единицу расстояния H (рисунок 1). Следовательно, при воздействии силы высотного градиента, создаваемого несущим винтом вертолета, в точке с давлением P_2 будет образовываться градиент концентрации за счет распространения воздушных масс со значительно меньшей концентрацией идентифицируемого вещества.

Отсюда следует, что для образования градиента концентрации в точке P_2 достаточно наличие воздушного потока со скоростью v , минимальное значение которой будет зависеть от концентраций C_1, C_2 . Кроме того, на изменения высотного градиента (барической ступени) и, как следствие, на градиент концентрации вещества будет влиять температура воздуха.



Определение зависимостей скорости воздушного потока от высоты зависания H и удаления от точки проекции оси несущего винта на поверхность земли проводилось экспериментальным путем. Полученные в ходе эксперимента данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость значений скорости воздушного потока от высоты зависания и удаления от точки проекции оси несущего винта на поверхность земли для вертолета Ми-8 МТВ

| Удаление от эпицентра оси несущего винта, м | Высота, м | | | |
|---|-----------|----|------|------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 |
| 25 | 18 | 21 | 17,5 | 16 |
| 35 | 15 | 19 | 16 | 13,5 |
| 45 | 13 | 14 | 13,5 | 11,5 |
| 55 | 10 | 12 | 10 | 9 |
| 65 | 9 | 11 | 9 | 8,5 |
| 75 | 7 | 8 | 7 | 7 |

Исходя из данных, приведенных в таблице 1, можно выстроить графическую зависимость скорости воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, от удаления от его проекции на различных высотах (графики 1–4).

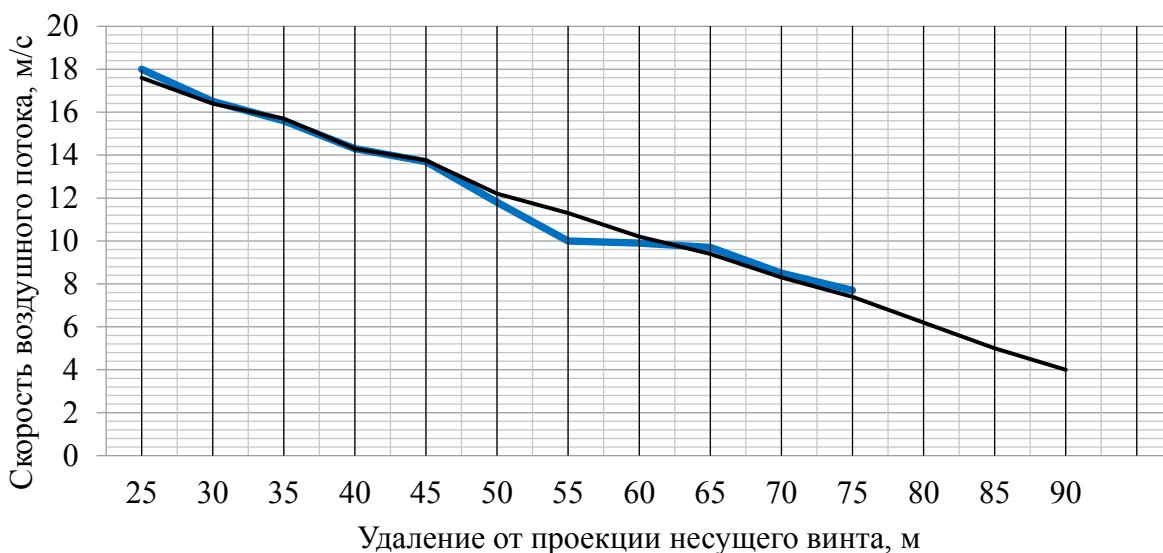


График 1 – Зависимость скорости воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, от удаления его проекции на поверхности земли

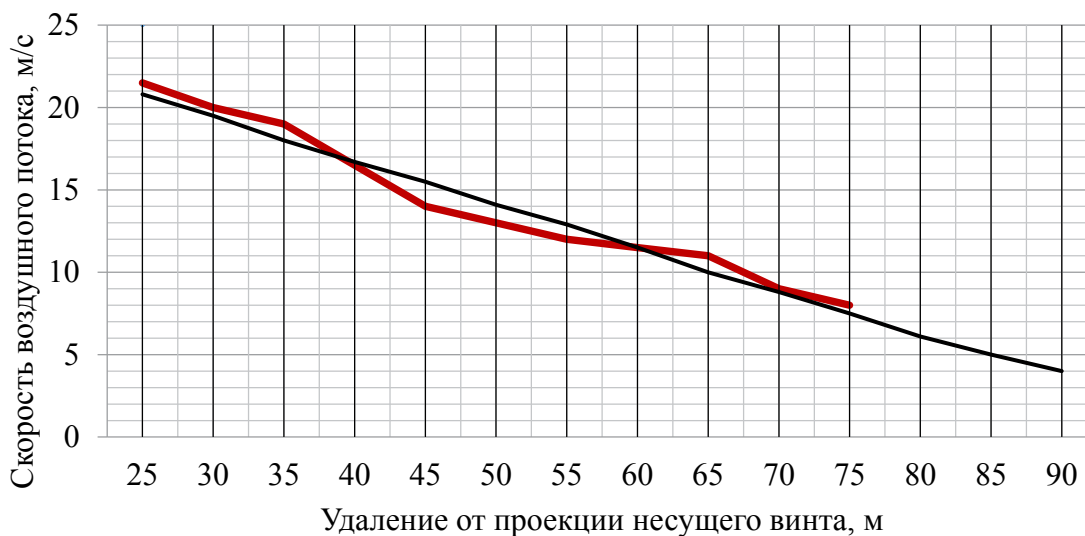


График 2 – Зависимость скорости воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, от удаления его проекции на высоте 10 м

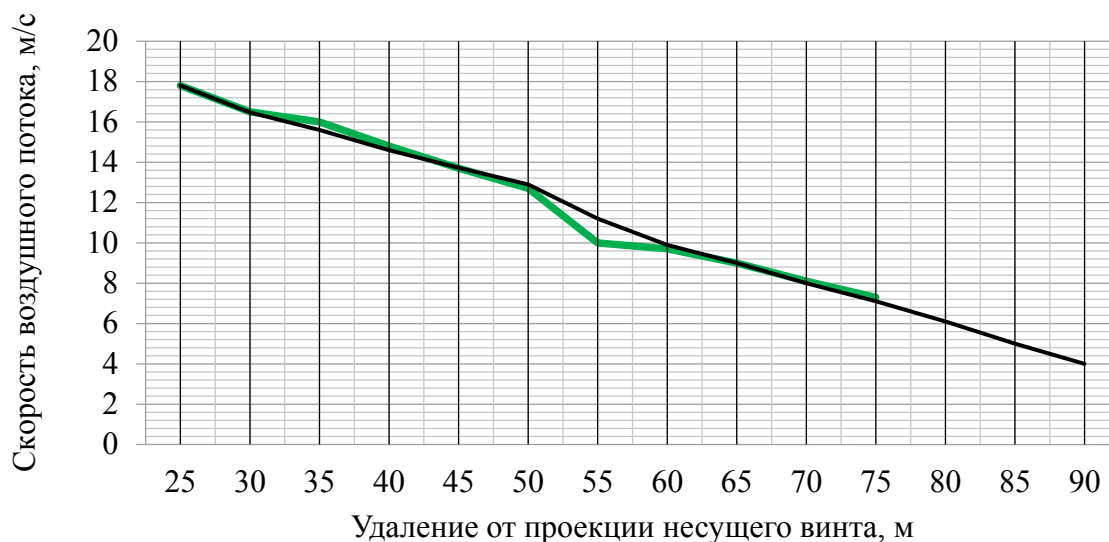


График 3 — Зависимость скорости воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, от удаления его проекции на высоте 20 м

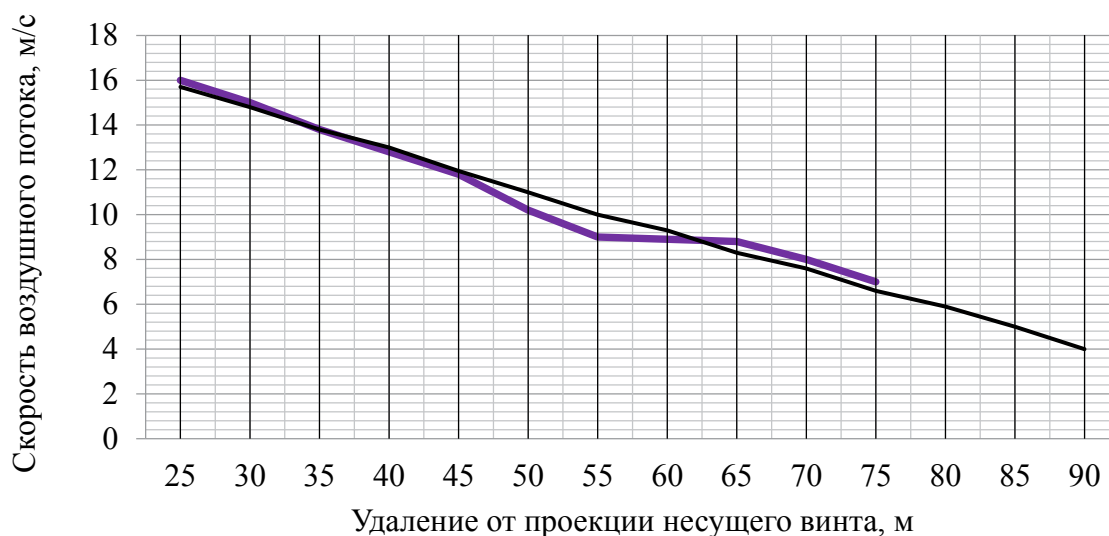


График 4 — Зависимость скорости воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, от удаления его проекции на высоте 30 м

Формула, по которой измеряется скорость воздушного потока, включает в себя давление, определяемое различными способами, и скорость несжимаемого потока, которая определяется с помощью зависимости разности полного и статического давления по отношению к плотности воздушной массы (уравнение Бернулли).

Зависимость скорости воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, от удаления от его проекции на высотах 10, 20 и 30 метров представлена в графиках 1–4.

Приведенные выше расчеты применимы для определения оптимального угла наклона оптико-механического блока пассивного инфракрасного спектрометра относительно корпуса вертолета в зависимости от выполняемых задач, характеристик прибора и воздушного средства.

Таким образом, определив высоту замера и требуемое удаление от проекции оси несущего винта, угол наклона оптико-механического блока Фурье-спектрометра можно рассчитать следующим образом:

$$\varphi = \arctg \frac{H}{L}, \quad (4)$$



где φ – угол наклона оптико-механического блока пассивного инфракрасного спектрометра относительно корпуса вертолета; H – высота замера; L – удаление точки замера от проекции оси несущего винта.

Данная методика имеет существенный недостаток – при недостаточной концентрации паров химических веществ идентификация в приземном слое не происходит (рисунок 2), поскольку $C_1 \approx C_2$, а абсолютное значение близко к нулю.

В этом случае эффективным средством может стать искусственное инициирование испарения химического вещества за счет использования электромагнитных волн (ЭМВ) сверхвысокого частотного диапазона (СВЧ), с частотой соответствующей спектру поглощения искомого вещества.

Решением этой проблемы для средств воздушной разведки может послужить создание градиента концентрации в приземном слое воздуха за счет искусственного испарения вещества с зараженной поверхности путем облучения участка местности электромагнитным излучением сверх высокочастотном (СВЧ) диапазоне с частотой, соответствующей спектру поглощения искомого вещества. Одновременно такое облучение будет приводить к разогреву поверхности и созданию необходимого теплового контраста в требуемой точке.

Зная, что при рассмотрении двух областей с различной концентрацией какого-либо вещества, разделённого полупроницаемой мембраной, градиент концентрации будет направлен из области меньшей концентрации вещества в область большей его концентрации, при этом вектор диффузионного потока направлен против вектора градиента концентрации, что в соответствии с принципом Ле-Шатле, приводит со временем к уменьшению этого потока и градиента концентрации. При этом скорость массопереноса (процесса диффузии) пропорциональна градиенту концентрации вещества.



Рисунок 2 – Влияние воздействия ЭМВ СВЧ-диапазона на парообразование химических веществ с зараженной поверхности

Особенностью работы Фурье-спектрометра является достижение определенного порога концентрации паров идентифицируемого вещества с зараженной поверхности. Обеспечение этого эффекта должно рассматриваться как решение комплексной задачи, в которой учтена масса вещества m в заданном угле обзора земной поверхности и удаленность измерителя от зараженного участка местности. Это достигается испарением с поверхности определенной массы идентифицируемого вещества, а теплота, расходуемая на испарение требуемой массы вещества, будет определяться по формуле:



$$Q_1 = lm, \quad (5)$$

где Q_1 – теплота, расходуемая на испарение; l – удельная теплота парообразования; m – масса вещества, переводимого в парообразное состояние.

Количество тепловой энергии, поглощаемой веществом под воздействием электромагнитного поля, можно определить следующим образом [5]:

$$Q_2 = 0,5\varepsilon_0\varepsilon_r \omega E_r^2, \quad (6)$$

где Q_2 – количество тепловой энергии, поглощаемой веществом под воздействием электромагнитного поля; ε_0 – электрическая постоянная $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$; ε_r – фактор потерь; ω – частота электромагнитного поля; E_r^2 – квадрат средней электрической напряженности в нагреваемой среде.

В момент равенства значений Q_1 и Q_2 в плоскости обзора прибора образуется концентрация паров идентифицируемого вещества C_3 , обеспечивающая выполнение обязательного условия идентификации веществ Фурье – спектрометром – наличие градиента концентрации.

Для образования концентрации паров идентифицируемого вещества C_3 в требуемых значениях необходимо переводить в парообразное состояние загрязняющих поверхность отравляющих веществ в необходимом объеме, обладающих низкой фугитивностью, путем нагрева методом пассивной инфракрасной спектрометрии для дальнейшей их идентификации в районах химического заражения.

Из вышеуказанного следует, что применение описанного в статье условия образования паров веществ с низкой фугитивностью путем их нагрева, под воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты для поиска очагов химического загрязнения поверхности и перевода в парообразное состояние загрязняющих поверхность химических веществ позволит значительно расширить их идентификацию, что повысит оперативность ведения ВХР. Предложенные способы поиска очагов химического загрязнения поверхности и перевода в парообразное состояние загрязняющих поверхность химических веществ требуют экспериментального подтверждения. Для более детального изучения и обоснования выполнения задач РХБ защиты вышеперечисленным способом необходимо составить тактико-техническое задание или расчётную задачу для отработки научно-исследовательских работ в научных центрах, научно-исследовательских институтах и ведущих ВУЗах Министерства обороны Российской Федерации.

Выводы. Решение задач определения концентрации токсических веществ при ведении химической разведки вертолетом Ми-24р возможно при использовании методов инфракрасной спектрометрии. Важнейшим условием измерений является тот факт, что концентрация токсичных веществ в приземном слое должна быть намного больше, чем вблизи несущего винта вертолета.

В широком смысле достижение таких условий не всегда является выполнимым, поскольку токсичные вещества могут быть стойкими, что приведет к нарушению условий корректной оценки их концентрации данным методом. Использование Фурье-спектрометров лишено таких недостатков, но для их эффективной работы необходимо, чтобы концентрация токсичных веществ была выше порогового значения для получения достоверных результатов. Для достижения этой цели необходимо использование ЭМВ СВЧ-диапазона, что с высокой долей вероятности позволит говорить о наличии токсичных веществ в данном секторе обзора земной поверхности. Одним из достоинств данного способа является возможность выявления токсичных веществ на некотором удалении от зараженной поверхности, что обеспечивает безопасность работы членов экипажа.



Разработка авиационных комплексов, способных производить регистрацию и идентификацию ТХ и АХОВ с воздуха, позволит создать эффективную систему ВХР местности, обеспечивающую органы военного управления информацией о химической обстановке в необходимом объеме.

Многочисленные исследования и материалы специальных войсковых учений свидетельствуют о том, что задача своевременного сбора и передачи данных о РХБ обстановке на пункты управления от локальных датчиков не имеет в настоящее время удовлетворительного решения в высших звеньях войск. В то же время потенциальные возможности дистанционных методов способны обеспечить централизованный сбор данных о химической обстановке, минуя общевойсковые каналы связи. При этом будет достигаться и другой качественно новый для системы химической разведки эффект: достоверные данные будут поступать на пункты управления в реальном масштабе времени даже в условиях радиоэлектронного противодействия противника.

В связи с вышеизложенным задача повышения эффективности выявления химической обстановки на основе использования активных и пассивных средств дистанционной химической разведки в тактическом, оперативном и стратегическом звеньях является актуальной научно-технической задачей, на основе создания подсистемы технических средств химической разведки нового поколения дистанционного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войсковые технические средства радиационной разведки и контроля с контрольными источниками ионизирующего излучения, эксплуатирующиеся в ВС РФ. М.: УНВ РХБЗ МО РФ, 2014. 127 с.
2. Тактика действий частей и подразделений войск РХБ защиты. Часть 1. М.: УНВ РХБЗ МО РФ, 2006. 256 с.
3. Редькин Н.А. ИК-Фурье спектроскопия и масс-спектрометрия в идентификации органических соединений. Самара: Самарский университет, 2019. 96 с.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 601 с.
5. Могилевский Ф.Е. Разработка технологии выпаривания фосфорной кислоты энергией электромагнитного поля сверхвысокой частоты и методика расчета выпарного аппарата. М.: МГУИЭ, 2009. 16 с.

REFERENCES

1. Vojskovyye tehnikeskie sredstva radiacionnoj razvedki i kontrolya s kontrol'nymi istochnikami ioniziruyuschego izlucheniya, `ekspluatiruyuschiesya v VS RF. M.: UNV RHBZ MO RF, 2014. 127 p.
2. Taktika dejstvij chastej i podrazdelenij vojsk RHB zaschity. Chast' 1. M.: UNV RHBZ MO RF, 2006. 256 p.
3. Red'kin N.A. IK-Fur'e spektrometriya i mass-spektrometriya v identifikacii organicheskikh soedinenij. Samara: Samarskij universitet, 2019. 96 p.
4. Abramovich G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika. M.: Nauka, 1991. 601 p.
5. Mogilevskij F.E. Razrabotka tehnologii vyparivaniya fosfornoj kisloty `energiej `elektromagnitnogo polya sverhvysokoj chastoty i metodika rascheta vyparnogo apparata. M.: MGUIE, 2009. 16 p.

© Бакин Э.Н., Копаев В.И., Кочетов Р.А., Червань Д.А., 2021

Бакин Эдуард Николаевич, кандидат военных наук, доцент, начальник кафедры радиационной, химической и биологической защиты, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия



имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, ben_1974@mail.ru.

Копаяев Владимир Игоревич, адъюнкт, Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко, Россия, 156013, г. Кострома, ул. Горького, 16.

Кочетов Руслан Александрович, преподаватель кафедры радиационной, химической и биологической защиты, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, mariyka.83@list.ru.

Червань Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиационной, химической и биологической защиты, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.