

ЭФФЕКТ НАСЫЩЕНИЯ ПРИ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА

Р.Н. Садовников

krz525@mail.ru

И.В. Кудымова

ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России, Вольск-18, Саратовская обл.,
Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрено двухкомпонентное облако, содержащее аэрозоль и газовый компонент, который необходимо идентифицировать спектрорадиометрическим методом. Проведен анализ совместного мешающего действия на идентификацию рассеяния излучения аэрозолем и насыщения спектра пропускания вне характерных линий поглощения. Получены аналитические решения частных уравнений пассивной локации облака в инфракрасном диапазоне длин волн. Показано, что каждое уравнение может иметь два решения. Решения дают минимальную и максимальную концентрации газового компонента, при которых возможна его идентификация в присутствии имеющейся концентрации аэрозоля. Получено асимптотическое решение, соответствующее случаю, когда при повышении концентрации газового компонента происходит насыщение только характерных линий поглощения. Решение дает предельное значение концентрации аэрозоля, при которой может быть идентифицирован газовый компонент для имеющегося отношения сигнал/шум используемого спектрорадиометра

Ключевые слова

Аварийный выброс, идентификация опасного вещества, газоаэрозольное облако, спектр поглощения, спектрорадиометр

Поступила в редакцию 30.11.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Выброс облака токсичного химиката при аварии на предприятии химической промышленности представляет собой существенную угрозу для жизни и здоровья людей [1–3]. В связи с этим своевременное установление факта аварии и образования облака, содержащего токсичный химикат, является основой обеспечения защиты как работников предприятия, так и населения, проживающего вблизи аварийного объекта [4–6].

Одним из наиболее эффективных технических средств, позволяющим определить не только факт аварии, но и оценить масштабы выброса, является спектрорадиометр, регистрирующий инфракрасные спектры газообразных веществ [6–9]. Однако наличие в облаке выброса, кроме газообразных веществ, также и аэрозольных частиц может повлиять на корректность работы такого прибора.

Для оценки возможности идентификации токсичного химиката при регистрации спектра поглощения газоаэрозольного облака в работе [10] была разработана модель, включающая в себя:

- облако газовой примеси, являющееся объектом индикации;
- твердый или жидкий аэрозоль, маскирующий газовое облако;
- трассу в воздушной среде, по которой осуществляется прохождение регистрируемого инфракрасного излучения;
- нагретый объект, обеспечивающий фоновое излучение, которое регистрируют после прохождения через газоаэрозольное облако.

Указанная модель позволяет оценить минимальную концентрацию токсичного химиката, при которой возможна его идентификация, исходя из заданного значения концентрации аэрозоля. Однако границы применимости полученных решений не установлены. Действительно, при достаточно большой концентрации газового компонента должно произойти практически полное насыщение спектра поглощения во всем рассматриваемом диапазоне длин волн. Следовательно, увеличение концентрации аэрозоля выше некоторого критического значения не позволит провести идентификацию газового компонента облака. В настоящей работе сделана попытка оценить предельные концентрации аэрозоля, при которых возможно идентифицировать газовый компонент облака выброса.

Постановка задачи. Предположим, что газообразные и аэрозольные загрязнения являются компонентами единого газоаэрозольного облака, в котором отсутствуют существенные флуктуации локальной плотности каждого компонента. Пусть оптическая толщина газового компонента равна

$$D_{\Gamma} = \sigma_{\Gamma} C_{\Gamma}, \quad (1)$$

где C_{Γ} — интегральная концентрация газообразной примеси на трассе, $\text{г}/\text{м}^2$; σ_{Γ} — сечение экстинкции, нормированное на массу газовой примеси, $\text{м}^2/\text{г}$.

Если сечение экстинкции одной молекулы равно $\sigma_{\text{мл}}$, то оптическую толщину можно определить по выражению

$$D_{\Gamma} = \frac{\sigma_{\text{мл}} N_A}{m_{\mu}} C_{\Gamma}, \quad (2)$$

где m_{μ} — молярная масса газообразного соединения, г ; N_A — число Авогадро.

Оптическая толщина аэрозольного компонента зависит от распределения частиц по размерам и может быть оценена следующим образом:

$$D_a = \int_{R_{\text{min}}}^{R_{\text{max}}} \sigma_a(R) C_a(R) dR. \quad (3)$$

Здесь σ_a — сечение экстинкции, нормированное на массу аэрозольной примеси, $\text{м}^2/\text{г}$; C_a — концентрация аэрозоля, $\text{г}/\text{м}^3$; R — радиус аэрозольных частиц, м ; R_{min} , R_{max} — минимальный и максимальный радиусы частиц, входящих в состав загрязнения, м .

Согласно теореме о среднем значении [11], выражение (3) можно переписать как

$$D_a = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma_a(R) C_a(R) dR = \sigma_a(R_c) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} C_a(R) dR = \sigma_a(R_c) C_{a.и}, \quad (4)$$

где $R_c \in [R_{\min}, R_{\max}]$; $C_{a.и}$ — интегральная концентрация аэрозоля, $г/м^2$.

Следовательно, без потери точности выполняемых расчетов выражений, содержащих толщину D_a , можно полагать, что облако содержит монодисперсный аэрозоль, имеющий некоторый средний радиус R_c . В этом случае оптическую толщину можно определить как

$$D_a = \frac{3K_e}{4R_c\rho} C_{a.и}, \quad (5)$$

где K_e — фактор эффективности экстинкции; ρ — плотность вещества аэрозоля, $г/см^3$.

Уравнение пассивной локации газоаэрозольного облака в инфракрасной области спектра было получено в работе [10]. Согласно этому уравнению, для идентификации токсичного химиката интенсивность поглощения фонового излучения на характерных для данного вещества спектральных линиях должна компенсировать рассеивание излучения аэрозолем. При условии отсутствия существенного рассеяния и поглощения излучения на трассе наблюдения и достижения термодинамического равновесия воздушной среды и газоаэрозольного облака выброса уравнение приобретает следующий вид:

$$\eta^{-1} = e^{-D_a} \left[e^{-D_r(\lambda+\Delta\lambda)} - e^{-D_r(\lambda)} \right]. \quad (6)$$

Здесь η — отношение сигнал/шум используемого спектро радиометра; λ — резонансная частота в спектре поглощения идентифицируемого газообразного вещества; $\Delta\lambda$ — полуширина рассматриваемой полосы поглощения.

Решение (6) предполагает определение соотношения D_r/D_a , а следовательно, и отношения $C_r/C_{a.и}$, при котором возможна достоверная идентификация токсичного химиката спектро радиометром, имеющим соотношение сигнал/шум η .

Аналитические решения уравнения пассивной локации. Уравнение локации (6) можно привести к степенному виду

$$z^k - z + e^{D_a} \eta^{-1} = 0, \quad (7)$$

где $z = e^{-D_r(\lambda+\Delta\lambda)}$; $k = \sigma_r(\lambda)/\sigma_r(\lambda+\Delta\lambda)$.

Уравнение (7) может быть решено в предположении о величине k . Очевидно, что точные аналитические решения уравнения могут быть получены при $k = 2, 3, 4$.

Аналитические решения, обладающие физическим смыслом, имеют две ветви. Наиболее простое аналитическое решение может быть получено при $k = 2$. С учетом (1) получаем решение

$$C_r^{(2a)} = -\frac{2}{\sigma(\lambda)} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - 4e^{D_a} \eta^{-1}}}{2}; \quad (8)$$

$$C_r^{(2b)} = -\frac{2}{\sigma(\lambda)} \ln \frac{1 - \sqrt{1 - 4e^{D_a} \eta^{-1}}}{2}. \quad (9)$$

При $k = 3$ решение имеет вид

$$C_r^{(3a)} = -\frac{3}{\sigma(\lambda)} \ln(A + B); \quad (10)$$

$$C_r^{(3b)} = -\frac{3}{\sigma(\lambda)} \ln\left(-\frac{A+B}{2} + i\frac{A-B}{2}\sqrt{3}\right), \quad (11)$$

где $A = \sqrt[3]{-\frac{e^{D_a}}{2\eta} + \sqrt{\frac{e^{2D_a}}{4\eta^2} - \frac{1}{27}}}$; $B = \sqrt[3]{-\frac{e^{D_a}}{2\eta} - \sqrt{\frac{e^{2D_a}}{4\eta^2} - \frac{1}{27}}}$.

При максимальной степени, допускающей аналитическое решение уравнения, получим

$$C_r^{(4a)} = -\frac{4}{\sigma(\lambda)} \ln(\sqrt{a} + \sqrt{b} + \sqrt{c}); \quad (12)$$

$$C_r^{(4b)} = -\frac{4}{\sigma(\lambda)} \ln(\sqrt{a} - \sqrt{b} - \sqrt{c}), \quad (13)$$

где

$$a = E + F; \quad b = -\frac{E+F}{2} + i\sqrt{3}\frac{E-F}{2}; \quad c = -\frac{E+F}{2} - i\sqrt{3}\frac{E-F}{2};$$

$$E = \sqrt[3]{\frac{1}{128} + \sqrt{-\frac{e^{3D_a}}{1728\eta^3} + \frac{1}{16380}}}; \quad F = \sqrt[3]{\frac{1}{128} - \sqrt{-\frac{e^{3D_a}}{1728\eta^3} + \frac{1}{16380}}}.$$

Если исходное уравнение (6) переписать относительно степеней $z = \exp[-D_r(\lambda)]$, то получим

$$z - \sqrt[k]{z} + e^{D_a} \eta^{-1} = 0. \quad (14)$$

Очевидно, что поскольку концентрация C_r является положительной величиной, степень z будет меньше 1. Следовательно, при $k \rightarrow \infty$ значение $\sqrt[k]{z}$ будет стремиться к 1.

В качестве конкретного примера рассмотрим линию поглощения аммиака на частоте 1084 см^{-1} . Поскольку сечение поглощения на этой частоте составляет $1,577 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2/\text{мол}$ [12], то согласно (2) интегральное сечение $\sigma_r = 0,588 \text{ м}^2/\text{г}$. При интегральной концентрации $C_r = 1 \text{ г}/\text{м}^2$ и $k = 60$ значение $\sqrt[k]{z}$ станет больше 0,99.

С учетом изложенного выше, в предельном случае уравнение (14) принимает вид

$$z - 1 + e^{D_a} \eta^{-1} = 0. \quad (15)$$

Решение (15) позволяет получить следующий результат:

$$C_r^{(\infty)} = -\frac{1}{\sigma(\lambda)} \ln(1 - e^{D_a} \eta^{-1}). \quad (16)$$

Связь уровня насыщения линий поглощения и возможности идентификации газового компонента облака выброса. Согласно анализу выражений (8), (10), (12) и (16), они имеют ограниченную область определения. Особенно наглядно это следует из анализа выражения (8). Максимальное значение концентрации $C_r^{(2a)}$ будет наблюдаться при минимальном значении выражения, стоящего под логарифмом. Следовательно, максимум концентрации $C_r^{(2a)}$ достигается, если

$$1 - 4e^{D_a} \eta^{-1} = 0, \quad (17)$$

где $D_a = \sigma_a(R_c)C_{a,i}$.

Решение (17) как уравнения относительно интегральной концентрации $C_{a,i}$ позволяет получить значение максимальной концентрации аэрозоля, при которой возможна идентификация токсичного химиката, находящегося в облаке в концентрации $C_r^{(2k)}$:

$$\max C_{a,i} = \frac{1}{\sigma_a(R_c)} \ln\left(\frac{\eta}{4}\right). \quad (18)$$

Если задавать значения концентрации аэрозоля выше $\max C_{a,i}$, то выражение, стоящее под квадратным корнем в (8) принимает отрицательные значения. С физической точки зрения это означает, что невозможно создать такую концентрацию газового компонента, которая обеспечит интенсивность полезного сигнала, достаточную для идентификации вещества при концентрации аэрозоля более $\max C_{a,i}$.

Анализ выражений (10) и (12) также показывает наличие конечной области определения и области значений. Решение (16), предполагающее практическое отсутствие сигнала вне линий поглощения, используемых для идентификации газообразного вещества, также обладает конечной областью определения. Однако значение $C_r^{(\infty)}$ асимптотически стремится к бесконечности при приближении концентрации $C_{a,i}$ к предельному значению

$$\max C_{a,i} = \frac{1}{\sigma_a(R_c)} \ln(\eta). \quad (19)$$

Если выбрать некоторое конкретное значение концентрации аэрозоля $C_{a,i} < \max C_{a,i}$, то можно определить минимальную концентрацию газового компонента, при которой возможно ее идентифицировать. В случае $k = 2$ со-

гласно (8) минимальная концентрация должна быть равна $C_r^{(2a)}$. Однако существует выражение (9), которое также является решением уравнения пассивной локации. Выражение (9) при подстановке того же значения концентрации аэрозоля $C_{a,и}$ дает значение концентрации газового компонента, равное $C_r^{(2b)}$. Полученному значению концентрации $C_r^{(2b)}$ соответствует максимальная концентрация газового компонента, при которой возможна ее идентификация, когда в облаке выброса присутствует аэрозоль в концентрации $C_{a,и}$.

Зависимости, ограничивающие области значений концентрации газа и аэрозоля, при которых возможно распознавание токсичного химиката, представлены на рис. 1. Кривые построены с использованием выражений (8)–(13) и (16). В качестве газообразного химиката был рассмотрен аммиак, распознавание которого осуществляется на основе анализа поглощения, в частности, на частоте 1084 см^{-1} .

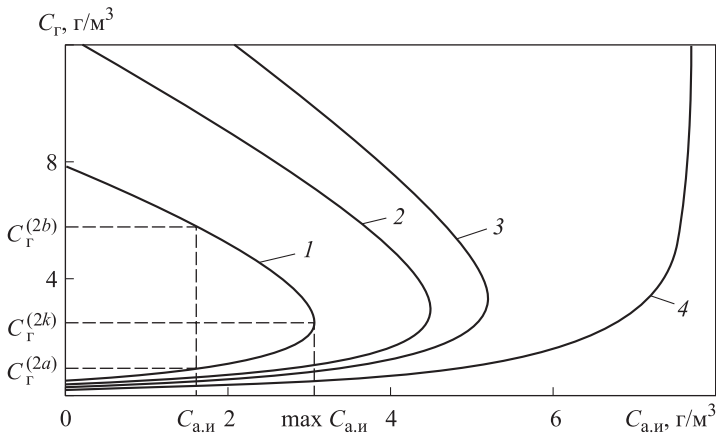


Рис. 1. Зависимости, ограничивающие области значений концентрации аммиака и пылевого аэрозоля в облаке выброса, при которых возможно распознавание токсичного химиката для $\eta = 10$ при $k = 2$ (1), 3 (2), 4 (3) и $k \rightarrow \infty$ (4)

Наличие верхней границы концентрации токсичного химиката, при которой возможна его идентификация, обусловлено тем, что высокая концентрация газового компонента является дополнительным фактором, снижающим вероятность распознавания особенностей спектра. Действительно, при увеличении концентрации, после достижения полного насыщения характерных линий спектра, будет снижаться и интенсивность излучения на участках спектра вне рассматриваемых линий.

Процесс насыщения спектра поглощения описывается в уравнении (6) разностью двух величин, одна из которых показывает коэффициент пропускания излучения на резонансной частоте

$$K(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-D_r(\lambda)} = e^{-\sigma_r(\lambda)C_r}, \tag{20}$$

а другая — вне характерной для вещества линии поглощения

$$K(\lambda + \Delta\lambda) = \frac{I(\lambda + \Delta\lambda)}{I_0(\lambda + \Delta\lambda)} = e^{-D_T(\lambda + \Delta\lambda)} = e^{-\sigma_T(\lambda + \Delta\lambda)C_T}. \quad (21)$$

Здесь I — интенсивность фонового излучения после прохождения через газовое облако; I_0 — интенсивность фонового излучения.

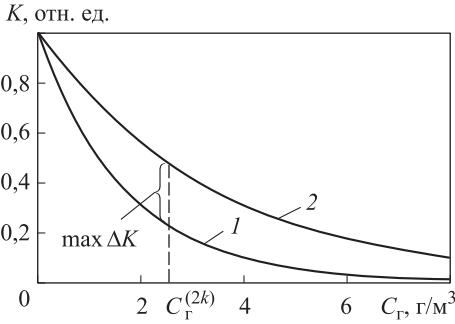


Рис. 2. Зависимости, построенные по (20) и (21) для линии аммиака на частоте 1084 см⁻¹ с центральной частотой (1) и вне линии (2) для модели с $k = 2$

Зависимости, построенные по (20) и (21) для линии аммиака на частоте 1084 см⁻¹, показаны на рис. 2. Разность $\Delta K = e^{-\sigma(\lambda + \Delta\lambda)C_T} - e^{-\sigma(\lambda)C_T}$ сначала возрастает, а затем начинает уменьшаться. Начало уменьшения связано с тем, что скорость насыщения резонансной линии вследствие приближения к пределу становится меньше скорости насыщения спектра вне линии. При этом очевидно, что значение максимальной разности ΔK соответствует случаю, когда идентификация токсичного вещества может быть проведена при наличии в облаке

максимально возможной концентрации аэрозоля $\max C_{a.и.}$

Заключение. Идентификация газообразного токсичного химиката в газо-аэрозольном облаке зависит не только от концентрации аэрозоля, но и от концентрации определяемого вещества. При достаточно низких абсолютных значениях повышение концентрации токсичного химиката увеличивает вероятность его обнаружения и идентификации в условиях мешающего действия аэрозоля. Однако если концентрация газообразного химиката превысит критическое значение, то за счет повышения интенсивности поглощения фонового излучения вне характерных линий определяемого вещества возможность идентификации достигается уже при меньших значениях концентрации аэрозоля.

Полученные результаты могут иметь важное значение при построении систем контроля химических предприятий, а также при разработке алгоритмов применения спектрорадиометров для мониторинга окружающей среды. В частности, рассмотренный методический подход позволяет, исходя из прогнозируемой мощности и возможного состава аварийного выброса, подобрать оптимальный состав локальных и дистанционных технических средств, обеспечивающих непрерывный и всесторонний контроль обстановки в широком спектре концентраций токсичных химикатов и мешающих примесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короленко Л.И., Сеницына О.Р. Методы измерения концентрации загрязнений в промышленных выбросах // Экология производства. 2011. № 11. С. 50–53.

2. Фокин М.В., Беспалов М.С., Оселедец Е.Ю., Успенская Т.М. Контроль качества атмосферного воздуха на границе расчетной СЗЗ // Экология производства. 2010. № 4. С. 50–52.
3. Molles M.C. Ecology: Concepts and applications. 4th ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 604 p.
4. Садовников Р.Н., Шаталов Э.В., Ефимов И.Н. Определение параметров выброса токсичного химиката на основе результатов срабатывания пороговых датчиков // Экологические системы и приборы. 2012. № 2. С. 3–8.
5. Садовников Р.Н., Бойко А.Ю., Шлыгин П.Е. Использование лидарного зондирования для оценки достоверности контроля химической обстановки в районе распространения облака токсичного вещества в ходе аварии на химическом предприятии // Экологические системы и приборы. 2013. № 1. С. 35–41.
6. Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. Пассивная локация химических соединений в открытой атмосфере с помощью фурье-спектрорадиометра // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 8. С. 34–47.
7. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы фурье-спектрорадиометрии. М.: Наука, 2014. 456 с.
8. Результаты экспериментальных исследований панорамного инфракрасного фурье-спектрорадиометра / С.В. Башкин, А.Ю. Бойко, В.Н. Корниенко, И.В. Кочкиков, М.В. Лельков, А.И. Миронов, А.Н. Морозов, А.А. Позвонков, А.С. Самородов, С.И. Светличный, С.Е. Табалин, И.Л. Фуфурин, П.Е. Шлыгин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 2. С. 51–64. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-51-64
9. Кочкиков И.В., Морозов А.Н., Фуфурин И.Л. Численные процедуры идентификации и восстановления концентраций веществ в открытой атмосфере при обработке единичного измерения фурье-спектрорадиометра // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36. № 4. С. 554–561.
10. Садовников Р.Н., Бойко А.Ю., Шлыгин П.Е. Оценка влияния особенностей состава газо-аэрозольного облака на спектр фонового излучения открытой атмосферы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2013. № 4. С. 69–78.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / под ред. И.Г. Арамановича; пер. с англ. М.: Наука, 1977. 832 с.
12. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / под ред. Ю.А. Пентина; пер. с англ. М.: Мир, 1991. 536 с.

Садовников Роман Николаевич — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУ «33ЦНИИИ» Минобороны России (Российская Федерация, 412918, Саратовская обл., Вольск, Вольск-8, ул. Красноказарменная, д. 1).

Кудымова Ирина Владимировна — научный сотрудник ФГБУ «33ЦНИИИ» Минобороны России (Российская Федерация, 412918, Саратовская обл., Вольск, Вольск-8, ул. Красноказарменная, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Садовников Р.Н., Кудымова И.В. Эффект насыщения при пассивной локации газоаэрозольного облака // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 2. С. 60–69. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-2-60-69

SATURATION EFFECT AT PASSIVE LOCATION OF GAS-AEROSOL CLOUD**R.N. Sadovnikov**
I.V. Kudymova

krz525@mail.ru

Federal State Budgetary Institution 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of Russian Federation, Vol'sk-18, Saratov Region, Russian Federation

Abstract

The study tested a two-component cloud containing an aerosol and gas component, which is necessary to identify by spectroradiometric method. We analyzed the joint disturbing action on identification of aerosol radiation scattering and the transmission spectrum saturation outside of the characteristic absorption lines. We obtained analytical solutions for specific equations of the passive cloud location in the infrared wavelength range. The study shows that each equation can have two solutions. The solutions give the minimum and maximum concentrations of the gaseous component, when it is possible to identify it in the presence of the available aerosol concentrations. We obtained an asymptotic solution corresponding to the case when at the concentration of gas components there occurs saturation of only characteristic absorption lines. The solution shows the limit value of the aerosol concentration, when it is possible to identify the gas component for the existing signal/noise ratio of the used spectroradiometer

Keywords

Emergency emission, identification of dangerous substance, gas-aerosol cloud, absorption spectrum, spectroradiometer

REFERENCES

- [1] Korolenko L.I., Sinitsyna O.R. Measurement technique for pollution load in industrial discharge. *Ekologiya proizvodstva* [Industrial Ecology], 2011, no. 11, pp. 50–53 (in Russ.).
- [2] Fokin M.V., Bepalov M.S., Oseledets E.Yu. Atmosphere air quality control on boundary of estimated sanitary protection zone. *Ekologiya proizvodstva* [Industrial Ecology], 2010, no. 4, pp. 50–52 (in Russ.).
- [3] Molles M.C. Ecology: Concepts and applications. 4th ed. New York, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 604 p.
- [4] Sadovnikov R.N., Shatalov E.V., Efimov I.N. Definition of parameters of toxic chemical emission on the basis of results of detectors operation threshold. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], 2012, no. 2, pp. 3–8 (in Russ.).
- [5] Sadovnikov R.N., Boyko A.Yu., Shlygin P.E. Usage of lidar sensing for the estimation of control accuracy of chemical environment in the area of toxic substance cloud spreading in the course of accident at the chemical plant. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], 2013, no. 1, pp. 35–41 (in Russ.).
- [6] Morozov A.N., Svetlichnyy S.I., Tabalin S.E. Passive remote sensing by FTIR radiometer. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2007, no. 8, pp. 34–47 (in Russ.).

- [7] Morozov A.N., Svetlichnyy S.I. *Osnovy fur'ye-spektroradiometrii*. Moscow, Nauka Publ., 2014. 456 p.
- [8] Bashkin S.V., Boyko A.Yu., Kornienko V.N., Kochikov I.V., Lel'kov M.V., Mironov A.I., Morozov A.N., Pozvonkov A.A., Samorodov A.S., Svetlichnyy S.I., Tabalin S.E., Fufurin I.L., Shlygin P.E. Experimental results of investigating panoramic Fourier transform infrared spectrometer. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 2, pp. 51–64 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-51-64
- [9] Kochikov I.V., Morozov A.N., Fufurin I.L. Numerical procedures for substances identification and concentration calculation in the open atmosphere by processing a single FTIR measurement. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2012, vol. 36, no. 4, pp. 554–561 (in Russ.).
- [10] Sadovnikov R.N., Boyko A.Yu., Shlygin P.E. Estimation of influence of features of the gas-aerosol cloud composition on the background radiation spectrum of the exposed atmosphere. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2013, no. 4, pp. 69–78 (in Russ.).
- [11] Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical handbook for scientists and engineers: Definitions, theorems, and formulas for reference and review*. McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [12] Nakamoto K. *Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds, theory and applications in inorganic chemistry*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1966.

Sadovnikov R.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Chief Research Scientist of Federal State Budgetary Institution 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of Russian Federation (Krasnokazarmennaya ul. 1, Vol'sk, Vol'sk-18, Saratov Region, 412918 Russian Federation).

Kudymova I.V. — Researcher Scientist of Federal State Budgetary Institution 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of Russian Federation (Krasnokazarmennaya ul. 1, Vol'sk, Vol'sk-18, Saratov Region, 412918 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sadovnikov R.N., Kudymova I.V. Saturation Effect at Passive Location of Gas-Aerosol Cloud. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 2, pp. 60–69.
DOI: 10.18698/1812-3368-2017-2-60-69