

Обоснование показателей эффективности функционирования системы мониторинга химической обстановки критически важных объектов

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2023.20.2.76

© Технологии гражданской безопасности, 2023

К.С. Васнецов, А.В. Вилков, А.Ф. Найданов, И.В. Свитнев

Аннотация

В статье предложен методический подход, основанный на теории эффективности технических систем, который позволяет обосновать показатели эффективности функционирования системы мониторинга химической обстановки (полнота данных, достоверность, оперативность) и их критерии. Авторами предложена требуемая чувствительность технических средств мониторинга химической обстановки по ряду токсичных химических веществ.

Ключевые слова: техническая система; достоверность; оперативность; полнота данных; мониторинг химической обстановки; технические средства; эффективность.

Substantiation of the Critical Facilities Chemical Situation Monitoring System Performance Indicators

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2023.20.2.76

© Civil Security Technology, 2023

K. Vasnetsov, A. Vilkov, A. Naidanov, I. Svitnev

Abstract

The article proposes methodological approach based on the theory of technical systems effectiveness, which allows substantiating the performance indicators of the chemical monitoring system (completeness of data, reliability, efficiency) and their criteria. The authors proposed the required technical means sensitivity of monitoring chemical situation for a number of toxic chemicals.

Key words: technical system; reliability; efficiency; completeness of data; monitoring of the chemical situation; technical means; efficiency.

23.03.2023

Введение

Состояние химической безопасности определяется состоянием защищенности персонала критически важных объектов от негативного воздействия опасных химических факторов, при котором химический риск остается на допустимом уровне [1]. Наличие опасных химических факторов, способных привести к ухудшению ситуации в области химической безопасности и (или) перерастанию ее в чрезвычайную ситуацию химического характера, представляет собой химическую угрозу.

Одними из основных химических угроз являются [2–6]:

широкое использование химических веществ с высокой токсичностью, накопление в окружающей среде опасных химически стойких соединений;

распространение и (или) использование химического оружия, совершение террористических актов с применением потенциально опасных токсичных химических веществ (ТХВ).

Таким образом, наличие эффективной системы мониторинга химической обстановки (МХО) позволит снизить риск воздействия поражающих факторов ТХВ на персонал, находящийся на критически важных объектах.

Показатели эффективности функционирования системы мониторинга химической обстановки

Возможность повышения эффективности системы МХО, обусловленная непрерывным развитием элементной базы для создания технических средств (ТС), способных регистрировать облако ТХВ на удалении от критически важного объекта, а также необходимость исключения (минимизации) прямого контакта персонала, задействованного для контроля за химической обстановкой, с зонами химического заражения путем внедрения автоматизированной системы МХО [7, 8], определяют актуальность обоснования требований к ТС с целью повышения эффективности функционирования этой системы.

Система МХО, как составная часть системы мониторинга радиационной, химической и биологической обстановки, представляет собой сложную техническую систему с множеством взаимосвязанных материальных объектов, рассматриваемых как единое целое, непосредственно участвующих в проведении определенных операций и объединенных общей целью функционирования.

При оценке эффективности системы МХО, как сложной технической системы, целесообразно использовать следующие показатели: оперативность, полнота, достоверность.

Оперативность характеризуется интервалом времени, необходимого для достижения цели МХО, — своевременного принятия мер защиты во время возникновения химического заражения. Временной интервал можно представить в виде нескольких интервалов (см. рис.).

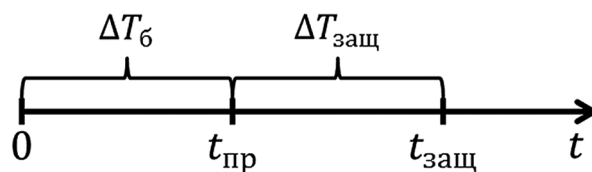


Рис. Временные интервалы, определяющие показатель оперативности системы МХО

Первый: с момента выброса ТХВ в атмосферу до момента его выявления ТС системы МХО $t_{пр}$, определяющий быстроту наступления аналитического эффекта $\Delta T_б$ (или, другими словами, быстродействие прибора). Второй: время, необходимое для принятия мер защиты $\Delta T_{защ}$ (перевод средств защиты органов дыхания в боевое положение и (или) занятие убежищ), соответствующее моменту времени $t_{защ}$.

Показателем полноты ведения МХО будет являться площадь, охваченная контролем за химической обстановкой S_k , по отношению ко всей площади $S_{общ}$ с учетом надежности этой системы:

$$P_{рн} = \frac{S_k}{S_{общ}} \cdot P_{тн}^{хн}, \quad (1)$$

где $P_{тн}^{хн}$ — показатель надежности системы МХО.

Площадь S_k , охватываемая наблюдением, зависит от способа мониторинга и качества средств измерения и ограничивается стоимостным (ресурсным) показателем C . Поэтому для каждого способа МХО необходимо решать оптимизационную задачу: $P_{рн} \rightarrow \max, C \rightarrow \min$.

В системе МХО под «достоверностью» понимается необходимая степень соответствия реальных показателей опасностей (концентрация ТХВ) на местности информации, выдаваемой этой системой.

Каждое ТС должно обладать определенным набором свойств, обеспечивающим получение результата или достижение цели применения ТС в системе МХО. Такие свойства называются целевыми или техническими. Основными для ТС являются: чувствительность, быстродействие (быстрота наступления аналитического эффекта), специфичность. Указанные свойства будем рассматривать в качестве частных показателей.

В статических условиях и гомогенной среде быстрота появления аналитического эффекта определяется константой скорости реакции; в динамических (которые являются наиболее типичными для индикации), кроме того, она определяется условиями накопления вещества до величины открываемого минимума или до создания предельной концентрации. Этими условиями являются: скорость пропускания потока зараженного воздуха; эффективность улавливания анализируемого вещества. В том случае, если эти условия строго стандартизированы, быстрота появления аналитического эффекта практически может служить мерой чувствительности определения.

Требование к быстроте появления аналитического эффекта предъявляется, исходя из токсичности химического вещества и времени накопления пороговой токсодозы.

В условиях постоянной концентрации ТХВ из рисунка следует, что:

$$(\Delta T_6 + \Delta T_{\text{защ}})C < PCt_{50}, \quad (2)$$

где:

PCt_{50} — средняя пороговая токсодоза, т. е. доза, вызывающая начальные симптомы поражения у 50% пораженных, измеряемая в мг·мин/л;

C — концентрация ТХВ, мг/л.

Тогда:

$$\Delta T_6 < \frac{PCt_{50}}{C} - \Delta T_{\text{защ}}. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что:

$$\frac{PCt_{50}}{C} > \Delta T_{\text{защ}}, \quad (4)$$

или

$$C < \frac{PCt_{50}}{\Delta T_{\text{защ}}}. \quad (5)$$

Другими словами, при большой концентрации ТХВ своевременность его определения ТС теряет смысл, так как в таких случаях появление первичных признаков отравления у отдельных лиц позволяет сделать вывод, что окружающая атмосфера опасна для дыхания. А определение ТХВ ТС в воздухе произойдет после получения PCt_{50} .

Таким образом, для того чтобы прибор обнаружил наличие ТХВ в воздухе раньше, чем накопится пороговая токсодоза PCt_{50} , чувствительность $C_{\text{ч}}$ ТС МХО должна иметь верхний порог по обнаружению ТХВ:

$$C_{\text{ч}} < \frac{PCt_{50}}{\Delta T_{\text{защ}}}. \quad (6)$$

Каждое ТХВ характеризуется диапазоном концентраций в зависимости от количества, выброшенного в атмосферу. Так, если ТХВ обладает смертельным действием, то его диапазон концентраций будет лежать в области: от минимальной концентрации, в короткое время вызывающей первые признаки поражения и в итоге — гибель организма, до концентрации, при которой организм погибает в течение минимального времени (1 минута). Это время также обусловлено физиологическими особенностями человеческого организма по задержке дыхания. Поэтому можно полагать, что интервал времени, необходимого для принятия мер защиты $\Delta T_{\text{защ}}$, должен быть не более одной минуты. Отсюда следует, что требуемый порог чувствительности ТС по разным ТХВ должен не превышать числовое значение пороговой токсодозы PCt_{50} , выраженной в мг·мин/л.

Каждый метод индикации ТХВ, реализованный в ТС МХО, обладает своей погрешностью. Поэтому для задания критерия по чувствительности $C_{\text{пч}}$ в формулу (6) необходимо ввести понижающий коэффициент, учитывающий погрешность метода индикации $K_{\text{м}}$:

$$C_{\text{пч}} = K_{\text{м}} \frac{PCt_{50}}{\Delta T_{\text{защ}}}. \quad (7)$$

Указанный коэффициент определяет запас по вероятности обнаружения ТХВ на требуемом уровне (например, не менее 0,9), на практике соответствующем кратному значению среднего квадратического отклонения измеряемой величины (правило трех сигма).

Таким образом, используя это правило для приборов с погрешностью не менее 30%, можно установить коэффициент $K_{\text{м}} = 0,5$.

Ниже приведены значения пороговых токсодоз некоторых ТХВ [9] и требуемая чувствительность ТС с учетом введенного коэффициента (см. таблицу).

Таблица
Токсичность ТХВ и требуемая чувствительность их определения

Токсичные химические вещества	Пороговая токсодоза PCt_{50} , мг·мин/л	Требуемая чувствительность, мг/л
Ви-экс (VX)	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$
Зоман (GD)	$5,00 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$
Зарин (GB)	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$
Иприт (HD)	$2,50 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$
Синильная кислота (AC)	0,10	$5,00 \cdot 10^{-2}$
Хлорциан (СК)	0,35	$1,75 \cdot 10^{-1}$
Фосген (CG)	0,60	$3,00 \cdot 10^{-1}$

Наконец, обязательными для ТС МХО являются обнаружение и отсеивание мешающих посторонних веществ в исследуемом объеме. Их влияние может проявляться как в маскировке аналитического эффекта, имеющего место при отсутствии примеси, так и в появлении аналогичного с определяемым веществом аналитического эффекта. В последнем случае мы будем иметь дело со специфичностью метода, под которой понимается способность появления аналитического эффекта только с определяемым веществом и непоявления его с другими веществами. Таким образом, специфичность определяет объективную идентификацию ТХВ в присутствии примеси.

Отсюда выразим показатель специфичности:

$$S = \frac{C_{\text{ч}}}{C_{\text{пч}}} \leq \frac{C_{\text{пч}}}{C_{\text{пч}}} = S_{\text{п}}, \quad (8)$$

где:

$C_{\text{пч}}$ — пороговая концентрация примеси в воздухе, которая вызывает ложное срабатывание прибора;

$S_{\text{п}}$ — порог специфичности, представляющий собой критерийное значение для этого показателя.

Применив выражение (7), определим порог специфичности для технических средств:

$$S_{\text{п}} = \frac{K_{\text{м}} PCt_{50}}{C_{\text{пч}} \cdot \Delta T_{\text{защ}}}. \quad (9)$$

Из выражений (2–9) видно, что показатели системы МХО (чувствительность, быстродействие и специфичность) взаимосвязаны между собой. При этом быстрота наступления аналитического эффекта есть временная характеристика чувствительности. В свою очередь,

специфичность включает в себя чувствительность. Такая взаимосвязь позволяет обосновать показатель достоверности функционирования системы МХО.

Особенностью этого показателя является то, что он должен учитывать каждое i -ое известное ТХВ по отношению к j -ой примеси. Тогда, взяв за основу выражения (8) и (9), перепишем их в следующем виде:

$$S_{ij} = \frac{C_{чи}}{C_{пнj}} \leq \frac{K_M P C t_{50i}}{C_{пнj} \Delta T_{защ}} = S_{пнj}, \quad (10)$$

где:

S_{ij} — специфичность определения i -го ТХВ в присутствии j -ой примеси;

$C_{чи}$ — чувствительность к определению i -го ТХВ, мин/л;

$C_{пнj}$ — пороговая концентрация j -ой примеси в воздухе, которая вызывает ложное срабатывание прибора, мин/л;

$P C t_{50i}$ — средняя пороговая токсодоза i -го ТХВ, мг·мин/л;

$S_{пнj}$ — порог специфичности определения i -го ТХВ в присутствии j -ой примеси.

Совокупность показателей $S[n; m]$ (где: n — количество известных ТХВ; m — количество возможных примесей), значения которых лежат в критериальной области $(0; S_{пнj}]$, определяют специфичность идентификации определенного ТХВ на фоне различных примесей.

Тогда, под «достоверностью системы МХО» предлагаем понимать вероятность правильной и своевременной идентификации ТХВ на фоне примесей, т.е. вероятность того, что концентрация i -го ТХВ $C_{ТХВи}$ выше чувствительности $C_{чи}$ к нему при условии, что отношение концентрации i -го ТХВ $C_{ТХВи}$ к j -ой примеси $C_{пнj}$ будет больше, чем специфичность S_{ij} к i -му ТХВ в присутствии j -ой примеси:

$$D_{ij} = P\{A_i\} \cdot P\{A_i | B_{ij}\}, \quad (11)$$

где:

A_i — событие, при котором $C_{ТХВи} \geq C_{чи}$;

B_{ij} — событие, при котором $\frac{C_{ТХВи}}{C_{пнj}} \geq S_{ij}$.

В таком случае имеем две случайные величины: $C_{ТХВи}$ и

$$\frac{C_{ТХВи}}{C_{пнj}},$$

которые распределены в интервале $[0; \infty)$.

При этом концентрацию j -ой примеси $C_{пнj}$ можно полагать постоянной, тогда закон распределения этих случайных величин будет одинаковым и дальнейшее развитие математического аппарата по оценке

показателя достоверности системы МХО зависит от обоснования этого закона распределения (на наш взгляд наиболее применимо распределение Релея). Однако уже на этом этапе становится понятным, что применение на практике рассмотренного методического подхода для всей совокупности $C[n]$ и $S[n; m]$ ($C[n]$ — матрица-вектор чувствительностей к n ТХВ) и для различных ТС, применяемых в системе МХО, становится возможным, но достаточно трудоемким.

Заключение

Таким образом, в статье предложены показатели эффективности функционирования системы МХО и обоснованы их критерии. Рассмотренный методический подход к обоснованию эффективности функционирования системы МХО является основой для дальнейшего развития научно-методического аппарата в этой области и позволяет задавать технические требования к различным ТС, применяемым для регистрации (обнаружения) ТХВ, и к системе МХО в целом. В свою очередь, на основе анализа показателей эффективности функционирования рассматриваемой системы имеется возможность обосновать ее технический облик, реализация которого позволит существенно повысить качество ведения МХО.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 11 марта 2019 г. № 97 «Основы государственной политики Российской Федерации в области обеспечения химической и биологической безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» // Портал Президента России. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44066> (дата обращения: 11.04.2023).
2. Иноземцев В. А. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / В. А. Иноземцев, Б. В. Серебрянников // Вестник Академии военных наук. 2018. № 2 (63). С. 161–170.
3. Сирийская «химическая война» / В. А. Ковтун, Д. П. Колесников, М. В. Супотницкий и др. // Вестник войск РХБ защиты. 2018. Т. 2. № 3. С. 7–39.
4. Обзор важнейших международных событий в области РХБ безопасности // Вестник войск РХБ защиты. 2018. Т. 2. № 1. С. 74–85.
5. Киселев Р. В. Выполнение задач (мероприятий) радиационной, химической и биологической защиты войсками радиационной, химической и биологической защиты ВС РФ в современных условиях // Военная мысль. 2022. № 10. С. 59–71.
6. Нурслямов М. Б. Проблемы химического загрязнения окружающей среды при эксплуатации комплекса «Байконур» // Проблемы обеспечения химической безопасности: Сб. трудов IV Всероссийской научно-практической конференции, Химки, 6 декабря 2022 года. Химки: АГЗ МЧС России, 2023. С. 86–90.
7. Кучумова Г. В. Применение систем контроля химической обстановки / Г. В. Кучумова, И. Ю. Петров // АПК: инновационные технологии. 2019. № 3 (46). С. 34–38.
8. Рябышенков А. С. Построение автоматизированной системы мониторинга окружающей среды / А. С. Рябышенков, Е. А. Волкова, М. Д. Трашко // Синтез науки и образования в решении экологических проблем современности: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню охраны окружающей среды, Воронеж, 3 июня 2022 года. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2022. С. 243–249.
9. Александров В. Н. Отравляющие вещества / В. Н. Александров, В. И. Емельянов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Воениздат, 1990. 271 с.

Сведения об авторах

Васнецов Константин Сергеевич: адъютант, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, подполковник.
Санкт-Петербург, Россия.
SPIN-код: 2596-0252.

Вилков Алексей Владимирович: к. т. н., Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, преподаватель, подполковник.
Санкт-Петербург, Россия.
SPIN-код: 1624-3315.

Найданов Александр Фотеевич: к. т. н., доц., Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, ст. преподаватель.
Санкт-Петербург, Россия.
SPIN-scientific: 3678-9568.

Свитнев Игорь Владимирович: к. в. н., доц. Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, доцент кафедры.
Санкт-Петербург, Россия.
SPIN-код: 8142-8660.

Information about author

Vasnetsov Konstantin S.: Adjunct, Militaryspace Academy named after A.F.Mozhaisky, Lieutenant Colonel.
Saint-Petersburg, Russia.
SPIN-scientific: 2596-0252.

Vilkov Aleksey V.: PhD (Technical Sc.), Military space Academy named after A.F. Mozhaisky, Lecturer, Lieutenant Colonel.
Saint-Petersburg, Russia.
SPIN-scientific: 1624-3315.

Naidanov Alexandr F.: Ph.D (Technical Sc.), Associate Professor, Military space Academy named after A.F. Mozhaisky, Senior Lecturer.
Saint-Petersburg, Russia.
SPIN-scientific: 3678-9568.

Svitnev Igor V.: PhD (Military Sc.), Associate Professor, Military space Academy named after A.F. Mozhaisky, Associate Professor of the Department.
Saint-Petersburg, Russia.
SPIN-scientific: 8142-8660.

Издания ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)

Авторы, название	URL
Пашинин В.А. и др. Обнаружение загрязнённости поверхностей объектов агрессивными химическими веществами и соединениями урана.	https://elibrary.ru/item.asp?id=53761369
Творчество юных во имя спасения. Литературно-художественный альманах. Вып. № 7.	https://elibrary.ru/item.asp?id=53763100
Устойчивость городов в аспекте климатических изменений: проблемы и пути решения: Сборник докладов панельной дискуссии (круглого стола) в рамках III Международного пожарно-спасательного конгресса МЧС России.	https://elibrary.ru/item.asp?id=53732701
II Научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности «RoboEmercom». Сборник материалов конференции.	https://elibrary.ru/item.asp?id=50031786
Жуков А.О. Системный анализ. Философско-методологические аспекты. Часть 1. Учебник.	https://elibrary.ru/item.asp?id=49470474
Жуков А.О. Системный анализ. Математические основы и методы. Часть 2. Учебник.	https://elibrary.ru/item.asp?id=50125298
Алымов А.В. и др. Информирование населения в чрезвычайных ситуациях: основные аспекты, проблемы и особенности. Монография	https://elibrary.ru/item.asp?id=50243296
Проблемы противодействия техногенным, биогеоэкологическим, социокультурным угрозам и пути их решения. Материалы научно-практической конференции.	https://elibrary.ru/item.asp?id=50329316
Морозова О.А. и др. Чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера в период с 2010 по 2021 год. Статистический сборник	https://elibrary.ru/item.asp?id=49939592
Григорьев В.Н. Принципы подготовки и написания диссертаций. Монография.	https://elibrary.ru/item.asp?id=49815881
Акимов В.А. и др. Прогнозно-аналитические решения по природным, техногенным и биолого-социальным угрозам единой системы информационно-аналитического обеспечения безопасности среды жизнедеятельности и общественного порядка «Безопасный город». Монография.	https://elibrary.ru/item.asp?id=49767511
Арефьева Е. В. и др. Устойчивость муниципальных образований Российской Федерации в условиях изменения климата. Монография.	https://elibrary.ru/item.asp?id=49448379