

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 504.063

О. Л. Дариенко, Д. Р. Цибульняк

Автомобильно-дорожный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
в г. Горловка

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрена модель формирования загрязненного атмосферного воздуха вследствие применения некоторых видов военной техники. Для оценки концентраций загрязняющих веществ, образующихся над площадью горения в результате взрыва, предложена методика, основанная на теории конвективной струи. Предлагаемый подход позволяет получать значения концентраций загрязняющих веществ в условиях эмиссии в атмосферу на высоту до трех и более значений диаметров воронки взрыва (или условного диаметра теплой поверхности), температуру и скорость горячей струи воздуха над теплой поверхностью, расход искомого вещества. Полученные данные позволят рассчитывать эмиссию в атмосферу загрязняющих веществ в зависимости от метеорологических условий местности, определять концентрацию основных кислотообразующих веществ с учетом вероятности выпадения кислотных осадков.

Ключевые слова: военные действия, взрыв, ракета, снаряд, качество атмосферного воздуха, конвективная струя, концентрация загрязняющих веществ, модель формирования атмосферного загрязненного воздуха, индекс качества воздуха

Введение

Современный ход боевых действий характеризуется нанесением ракетных ударов по гражданской инфраструктуре в населенных пунктах, что приводит, кроме человеческих потерь и разрушения материальных объектов, к значительному загрязнению атмосферного воздуха населенных пунктов. Исследователи неоднократно подчеркивали влияние военной деятельности и военных действий на развитие глобальных экологических проблем [1–4]. Для определения количества загрязняющих веществ, попадающих в атмосферу при взрыве и влияющих на изменение климата, или проходящих полное окисление и вызывающих кислотные осадки, необходимо иметь адекватный математический аппарат, основанный на применении методов математического моделирования, статистического анализа и учета законов химической кинетики. Кроме того, следует отметить, что неотъемлемой частью концепции создания современной инновационной модели мониторинговых наблюдений является тот факт, что они должны базироваться на синергии существующих математических моделей, статистических зависимостей и актуальных данных существующих систем наблюдений [5]. Данный математический аппарат может служить отдельным блоком в системе мониторинговых наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, учитывая загрязнение воздуха вследствие военных действий на территории населенных пунктов.

Исследование закономерностей распространения опасных веществ, связанных со взрывами боеприпасов, в последние годы является актуальным вопросом экологической безопасности. В существующих исследованиях важное значение уделено определению общего состава и количества загрязняющих веществ, образующихся в результате взрывов, с их последующим воздействием на окружающую среду и население. Эти вопросы частично рассмотрены в [6] на примере аварии на складе боеприпасов. Проблема формирования вторичных загрязнителей атмосферы при различных метеорологических условиях окружающей среды,

высоте столба взрыва и эмиссии антропогенных примесей в атмосферу Земли рассматривалась в основном относительно высоких незатененных источников загрязнения. Так, в [7] представлена математическая модель процессов формирования и выпадения кислотных осадков на территориях, прилегающих к зоне ТЭС, учитывающая двумерный тепло- и массоперенос, кинетику процесса конденсации, диффузию и конвекцию паров оксидов серы, которая решается численным способом методом конечных разностей.

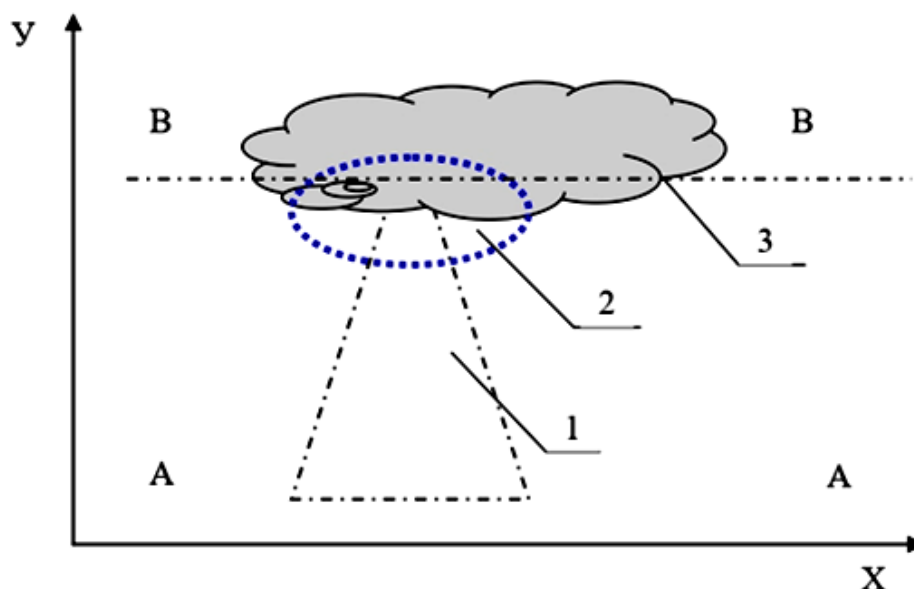
Цель работы

оценка выбросов загрязняющих веществ на основании построения модели конвективной струи, позволяющей определить формирование купола загрязнения над местом взрыва с учетом метеорологических условий на территории населенных пунктов.

Основная часть

Существующие методики оценки расстояний, на которые могут распространяться антропогенные компоненты выбросов, относятся в основном к выбросам высоких производственных труб. Методики, как правило, предусматривают определение концентраций на пути развития загрязненной струи на трех участках: зоны выброса факела загрязнения, зоны максимального загрязнения и постепенного снижения концентрации. Они основаны на реализации математической модели атмосферной диффузии и статистических моделей [8, 9]. Характер формирования теплового купола над теплой поверхностью городской среды с помощью уравнения количества движения загрязненного воздуха, его параметры и теплота источника достаточно детально описаны в [5]. Для определения параметров конвективной струи авторами использовался интегральный метод Л. Эйлера, заключающийся в равенстве изменений количества входных и выходных движений потока в обозначенный объем и суммы импульсов объемных активных и реактивных сил.

На наш взгляд, аналогичный подход правомерно применить при рассмотрении теплой загрязненной струи воздуха при одиночном взрыве снаряда (рисунок).



- 1 – столб взрыва; 2 – направление движения взрывчатых газов;
3 – условный локальный источник выбросов при распространении в атмосфере

Рисунок – Схема постановки задачи исследования

Рассматриваемый цилиндрический объем очерчен сечением А–А со стороны теплой поверхности и сечением В–В на границе участка формирования конвективной струи. Все

векторы движения атмосферного воздуха перпендикулярны вертикальной оси системы.

Условия формирования основных путей распространения загрязнений в воздухе зависят от некоторых метеоусловий местности и их комбинаций. Основными метеорологическими факторами можно считать скорость ветра, турбулентность атмосферы в пределах планетарного приграничного слоя и вертикальное распределение температуры (адиабатическое, инверсионное и слоистое многообразное).

На основе критерия Ричардсона R_i различают стабильные $R_i > 1$, нестабильные $R_i < 1$ и нейтральные при $R_i \approx 1$ условия атмосферы.

Согласно (1), нейтральность наступает при сбалансированности факторов, обуславливающих процессы дестабилизации и стабилизации атмосферы. Векторы движения атмосферного воздуха перпендикулярны вертикальной оси системы:

$$R_i = \frac{g \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial H} \right)}{T \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial H} \right)^2}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

T – средняя температура воздуха в слое δH , $^{\circ}\text{C}$;

$\partial t / \partial H$ – градиент потенциальной температуры;

$\partial u / \partial H$ – вертикальный градиент скорости ветра.

Удельная энергия взрывчатых веществ принимается 4184 Дж/г. Для ракеты типа JROF HEF, с боевой частью весом 400 кг, теплота по площади горения составляет $1,67 \cdot 10^9$ Дж или 399 139,57 ккал; зенитной ракеты средней дальности «БУК-М1», с боевой частью весом 50–70 кг, теплота по площади горения составляет $2,5 \cdot 10^8$ Дж или 59 751,43 ккал [10]. Данные о количестве выбросов некоторых кислотообразующих веществ и парниковых газов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Масса выброса отдельных веществ при взрыве ракеты типа JROF HEF и снаряда «БУК-М1»

| № п/п | Наименование загрязняющего вещества | Средний коэффициент удельных выбросов, т/т | Масса сгоревшего вещества, М, т | | Выбросы загрязняющего вещества, $M_{\text{г}}$, т | |
|-------|-------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|----------|----------------------------------------------------|------------|
| | | | JROF HEF | «БУК-М1» | JROF HEF | «БУК-М1» |
| 1. | Диоксид азота, NO_x | 0,0014 | 0,400 | 0,070 | 0,00056 | 0,000098 |
| 2. | Сернистый ангидрид, SO_2 | 0,000013 | 0,400 | 0,070 | 0,0000052 | 0,00000009 |
| 3. | Диоксид углерода, CO_2 | 3,449 | 0,400 | 0,070 | 1,3796 | 0,24143 |
| 4. | Оксид углерода, CO | 0,0063 | 0,400 | 0,070 | 0,00252 | 0,000441 |
| 5. | Твердые вещества, сажа | 0,0026 | 0,400 | 0,070 | 0,00104 | 0,000182 |

Разницу между средней температурой воздуха на поверхности горения и в самом узком сечении поднимающейся вверх теплой конвективной струи, а также среднюю скорость подъема теплого загрязненного воздуха определяем согласно формулам конвективной теплопередачи.

Средняя температура в переходном сечении конвективной струи определяется по формуле

$$\Delta t_y^{cp} = \frac{41 \cdot Q_s^{2/3}}{(y - y_0)^{5/3}}, \quad (2)$$

где Q_s – тепловой поток в процессе теплоотдачи, MDg/m²;

$(y - y_0)$ – расстояние от поверхности земли до наиболее узкого сечения конвективной вертикальной струи, м.

Среднюю по площади скорость поднимающегося вверх теплого воздуха находим по формуле

$$V_y = 0,56 \cdot \left(\frac{Q_s}{y - y_0} \right)^{0,33} \quad (3)$$

В рамках данного исследования принимаем диаметр воронки взрыва (или площади горения) в среднем равный 20 м (D), высоту конвективной струи порядка 100 м, тогда искомое сечение вертикальной конвективной струи составит примерно 60 м для ракеты типа JROF HEF и 30 м – для зенитной ракеты средней дальности «БУК-М1».

Соответственно для ракеты типа JROF HEF данные скорости составляют $V_y = 17,03$ м/с; для зенитной ракеты средней дальности «БУК-М1» – $V_y = 6,86$ м/с.

Данные о концентрациях загрязняющих веществ от взрыва в узком сечении загрязненной струи представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Концентрация загрязняющих веществ в конвективной струе взрыва от ракеты типа JROF HEF и снаряда «БУК-М1» на расстоянии 60 м и 30 м от поверхности земли в зависимости от типа снаряда

| № п/п | Наименование загрязняющего вещества | Выбросы загрязняющего вещества, M_e , т | | Расход вещества в верхней струе, м ³ /с | | Концентрация выброса C_x , мг/м ³ | | Значения ПДК загрязняющих веществ, мг/м ³ | |
|-------|-------------------------------------|-------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------|----------|------------------------------------------------|----------|------------------------------------------------------|-------------------|
| | | JROF HEF | «БУК-М1» | JROF HEF | «БУК-М1» | JROF HEF | «БУК-М1» | ПДК _{мр} | ПДК _{сс} |
| 1. | Диоксид азота, NO _x | 560 | 98 | 5347,42 | 251,985 | 104,72 | 38,8 | 0,2 | 0,04 |
| 2. | Сернистый ангидрид, SO ₂ | 5,2 | 0,9 | 5347,42 | 251,985 | 0,972 | 3,57 | 0,5 | 0,005 |
| 3. | Диоксид углерода, CO ₂ | 1379600 | 241430 | 5347,42 | 251,985 | 257990 | 958110 | – | – |
| 4. | Оксид углерода, CO | 2520 | 441 | 5347,42 | 251,985 | 471,2 | 1750 | 5 | 3 |
| 5. | Твердые вещества, сажа | 1040 | 182 | 5347,42 | 251,985 | 194,48 | 722 | 0,5 | 0,15 |

Для проверки правомерности данного подхода по определению загрязнения атмосферного воздуха от отдельных взрывов в результате военных действий был произведен расчет концентраций основных загрязняющих веществ и мониторинговых данных по качеству атмосферы вследствие обстрела ракетами типа JROF HEF г. Донецка 30 ноября 2023 года (таблица 3). Концентрации загрязняющих веществ получены на основе мониторинговых наблюдений, расчет индекса качества воздуха осуществлялся с помощью расчетно-аналитического метода.

Погрешность сопоставления данных результатов расчета с мониторинговой системой атмосферного воздуха зависит от расстояния до ближайших действующих пунктов наблюдений. В таблице 3 указано два пункта наблюдений, на которых зафиксированы данные наибольшего превышения выбросов отдельных веществ, средние данные указанных веществ, а также расчетные данные на расстоянии 2 км от условного места взрыва.

Таблица 3 – Концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе некоторых урбанизированных территорий Донбасса в результате взрыва от ракеты типа JROF HEF (расчетные данные)

| № п/п | Наименование загрязняющего вещества | Концентрация выброса C_x , мг/м ³ | Данные наблюдений, пост 1, мкг/м ³ | Данные наблюдений, пост 2, мкг/м ³ | Средние значения всех постов наблюдений, мкг/м ³ | Концентрация C_x в 2 км от условного падения ракеты, мкг/м ³ |
|-------|-------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Диоксид азота, NO _x | 104,72 | 55,2 | 41,4 | 47,1 | 65,0 |
| 2. | Сернистый ангидрид, SO ₂ | 0,972 | 1,3 | 1,6 | 2,1 | 0,55 |
| 3. | Оксид углерода, CO | 471,2 | 581 | 466,6 | 710,7 | 292 |
| 4. | Твердые вещества, сажа | 194,48 | 186,9 | 121,5 | 73,2 | 120,7 |
| 5. | Индекс качества воздуха | 185 | 184 | 149 | 103 | 182 |

Следует отметить, что предложенный подход к оценке, а также к прогнозированию концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в период ведения военных действий можно использовать при определенных условиях атмосферы, определяющих эмиссию загрязнений и превращений химических веществ в воздухе.

На основе данного подхода к определению концентраций загрязняющих веществ в верхней части конвективной загрязненной теплой струи от взрыва можно решать также ряд задач, в том числе и связанных с влиянием военных действий на развитие глобальных экологических процессов, а именно:

- определять концентрацию кислотообразующих веществ в вертикальной конвективной струе над поверхностью взрыва и долю их превращения в кислоты при определенных метеоусловиях (при решении задачи образования кислотных осадков от конкретного взрыва ракеты или снаряда);
- определять концентрации парниковых газов в загрязненной теплой струе воздуха и рассчитывать общий выброс парниковых газов от серии одиночных взрывов в пределах исследуемой территории;
- рассчитывать эмиссию загрязнений опасных веществ от конвективной струи по аналогии с высоким незатененным источником по известным методикам;
- использовать как подсистему при реализации интегрированной сети экологического мониторинга окружающей среды в результате боевых действий;
- осуществлять расчеты эколого-экономического ущерба от ведения боевых действий и т. д.

Выводы

Таким образом, оценку и прогнозирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух урбанизированных территорий при взрывах отдельных снарядов и ракет различного типа в результате военных действий можно осуществить на основании математической модели горячей конвективной струи от поверхности взрыва с последующим применением теории рассеяния и кинетических преобразований. Данный подход позволяет определить формирование купола загрязнения над местом взрыва в зависимости от метеоусловий местности, а также оценить влияние эмиссии загрязняющих веществ на окружающую среду и организм человека.

Список литературы

1. Димова, С. П. Обеспечение экологической безопасности в вооруженных силах РФ / С. П. Димова, А. Я. Олейникова // *Инновации. Наука. Образование.* – 2022. – № 50. – С. 1206–1210.
2. Деревянченко, А. А. Война и экология: некоторые современные аспекты / А. А. Деревянченко // *Вестник МНЭПУ.* – 2019. – № S1. – С. 120–122.
3. Война и экология. Конфликт между природой и человеком в период военных столкновений / С. Р. Гаджиева, Т. И. Алиева, З. Т. Велиева [и др.] // *Проблемы современной науки и образования.* – 2016. – № 1(43). – С. 264–266.
4. Дариенко, О. Л. Эскалация экологического кризиса в Донбассе на современном этапе // О. Л. Дариенко, М. В. Турбаба, Ю. В. Стрюкова // *Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике.* – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 34–38.
5. Дариенко, О. Л. Разработка методики детерминированной оценки риска воздействия военной деятельности на здоровье человека и окружающую среду / О. Л. Дариенко, В. В. Лихачева, Д. Р. Цибульняк // *Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute.* – 2023. – № 2(45). – С. 30–37.
6. Орел, С. М. Вероятностная оценка риска для населения, употребляющих питьевую воду после аварии на складе боеприпасов с помощью двухмерного метода Монте-Карло / С. М. Орел, М. С. Малеваный // *Екологічна безпека.* – 2013. – № 1(15). – С. 54–58.
7. Гвоздяков, Д. В. Численная оценка формирования условий атмосферного образования серной кислоты в районе расположения тепловой электрической станции / Д. В. Гвоздяков, В. Е. Губин, Г. В. Кузнецов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование.* – 2012. – № 2-2(147). – С. 195–200.
8. Формальдегидное загрязнение городской атмосферы и его зависимость от метеорологических факторов / Т. С. Селегей, Н. Н. Филоненко, В. А. Шлычков [и др.] // *Оптика атмосферы и океана.* – 2013. – Т. 26, № 5. – С. 422–426.
9. Aloyan, A. E. Mathematical Modelling of the Interaction of Gas Species and Aerosols in Atmospheric Dispersive Systems / A. E. Aloyan // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling.* – 2000. – Vol. 15, № 3-4. – P. 211–224.
10. Киселев, А. В. Анализ боевого потенциала сторон в конфликте средств огневого поражения противника и средств войсковой противовоздушной обороны / А. В. Киселев, С. И. Макаренко // *Системы управления, связи и безопасности.* – 2022. – № 1. – С. 8–48.

О. Л. Дариенко, Д. Р. Цибульняк

Автомобильно-дорожный институт (филиал)

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Донецкий национальный технический университет» в г. Горловка

Оценка загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных территорий в результате применения отдельных видов военной техники

Военные действия на урбанизированных территориях приводят к ухудшению качества атмосферного воздуха и состояния здоровья населения. Оценка такого воздействия актуализирует применение адекватного математического аппарата в системе мониторинговых наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, учитывая загрязнение воздуха вследствие военных действий на городской территории. С этой целью предложена модель формирования атмосферного загрязненного воздуха от взрывов некоторых видов ракет в результате военных действий, основанная на теории конвективной струи при оценке концентраций опасных веществ, образующихся над площадью горения в результате взрыва. Предложенная методика позволяет оценить концентрации загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу, на высоту до трех и более значений диаметров воронки взрыва, температуру и скорость горячей струи воздуха над теплой поверхностью, расход искомого вещества.

С целью проверки правомерности предложенного подхода проведена оценка загрязнения атмосферного воздуха вследствие нанесения ударов ракетами производства Словакии типа JROF HEF по г. Донецку. Рассчитаны выбросы загрязняющих веществ и их концентрации в воздухе в верхней части конвективной загрязненной струи при отдельных взрывах ракеты типа JROF HEF. Погрешность сопоставления данных результатов расчета с мониторинговой системой атмосферного воздуха зависит от расстояния до ближайших действующих пунктов наблюдений. Данный подход к оценке и прогнозированию концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе может использоваться при нейтральных условиях атмосферы, определяющих эмиссию загрязнений и превращений химических веществ в воздухе.

ВОЕННЫЕ ДЕЙСТВИЯ, ВЗРЫВ, РАКЕТА, СНАРЯД, КАЧЕСТВО АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА, КОНВЕКТИВНАЯ СТРУЯ, КОНЦЕНТРАЦИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ, МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕННОГО ВОЗДУХА, ИНДЕКС КАЧЕСТВА ВОЗДУХА

O. L. Darienko, D. R. Tsybulniak
Automobile and Road Institute (Branch) of the Federal State Budget Educational Institution
of Higher Education «Donetsk National Technical University» in Gorlovka
Air Pollution Assessment in Urban Areas as a Result of the Use of Certain Types
of Military Equipment

Military actions in urban areas lead to the deterioration in the quality of the atmospheric air and the health of the population. Assessing such an impact actualizes the use of an adequate mathematical apparatus in the system of monitoring observations of the atmospheric air state, taking into account air pollution due to military actions in urban areas. For this purpose, a model is proposed for the formation of the atmospheric polluted air from explosions of certain types of missiles as a result of military actions, based on the theory of the convective jet when assessing the concentrations of hazardous substances formed above the combustion area as a result of an explosion. The proposed method makes it possible to estimate the concentrations of pollutants entering the atmosphere at a height of up to three or more explosion crater diameters, the temperature and speed of a hot air stream over a warm surface, and the consumption of the desired substance.

In order to verify the validity of the proposed approach, an assessment of atmospheric air pollution due to attacks by Slovakian-made JROF HEF missiles on the city of Donetsk is carried out. The emissions of pollutants and their concentrations in the air in the upper part of the convective contaminated jet during separate explosions of a JROF HEF rocket are calculated. The error in comparing these calculation results with the atmospheric air monitoring system depends on the distance to the nearest existing observation points. This approach to assessing and predicting the concentrations of pollutants in the atmospheric air can be used under neutral atmospheric conditions that determine the emission of pollutants and transformations of chemicals in the air.

MILITARY ACTIONS, EXPLOSION, ROCKET, PROJECTILE, ATMOSPHERIC AIR QUALITY, CONVECTION JET, CONCENTRATION OF POLLUTANTS, ATMOSPHERIC POLLUTED AIR MODEL FORMATION, AIR QUALITY INDEX

Сведения об авторах:

О. Л. Дариенко

SPIN-код РИНЦ: 4259-2959
Телефон: +7 949 330-85-05
Эл. почта: osnovi.ekologiyi@gmail.com

Д. Р. Цибульняк

Телефон: +7 949 369-78-32
Эл. почта: andrei59289123@gmail.com

Статья поступила 04.12.2023

© О. Л. Дариенко, Д. Р. Цибульняк, 2024

*Рецензент: М. В. Коновальчик, канд. техн. наук,
Автомобильно-дорожный институт
(филиал) ДонНТУ в г. Горловка*