
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 614.841

Научная статья

К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗОН ТОКСИЧЕСКОГО ЗАРАЖЕНИЯ В СЛУЧАЯХ ПОЖАРА НА ПОЛИГОНАХ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ

✉ Савчук Олег Николаевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ oleg-savcuk@mail.ru

Аннотация. Приведен анализ статистических данных о росте количества твердых коммунальных отходов в мире и на территории России, ежегодный прирост которых возрастает. Приведены данные по количеству полигонов с твердыми коммунальными отходами и их размещению по площади на территории страны. Рассмотрены проблемы по утилизации отходов и невозможности их полной переработки в России. Одной из проблем рассматривается повышение вероятности отравления людей, расположенных в населенных пунктах вблизи таких полигонов, в результате пожаров в связи с увеличением в морфологическом составе отходов упаковочных изделий, которые при возгорании выделяют опасные химические вещества. Рассмотрен анализ существующих методик прогнозирования последствий пожаров на полигонах и свалках с твердыми коммунальными отходами и предложена методика прогнозирования на основе известной ОНД-86, позволяющая определять зону токсического заражения при пожарах на полигонах с твердыми коммунальными отходами с учетом возможного более достоверного количественного и качественного состава отходов. Приводятся расчеты по определению зон токсического заражения при пожарах на полигоне по предлагаемой методике и показаны получаемые завышенные результаты при использовании исходных данных по определению выброса массы опасных химических веществ существующих нормативных документов. Предлагаемая методика позволяет рассчитывать способы укладки, обеспечивающие наименьший выход опасных химических веществ при пожарах на полигонах твердых коммунальных отходов.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, опасные химические вещества, зона токсического заражения воздуха, концентрация опасного химического вещества, глубина порогового заражения

Для цитирования: Савчук О.Н. К вопросу прогнозирования зон токсического заражения в случаях пожара на полигонах с твердыми коммунальными отходами // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 176–187.

Scientific article

IMPROVING THE METHODOLOGY OF PREDICTING TOXIC CONTAMINATION ZONES IN CASES OF FIRE AT SOLID MUNICIPAL WASTE LANDFILLS

✉ Savchuk Oleg N.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ oleg-savcuk@mail.ru

Abstract. The article provides an analysis of statistical data on the growth of solid municipal wastes in the world and in Russia, the annual growth of which is increasing. Data on the quantity of grounds for solid municipal wastes disposal and their distribution over the territory of the country are given. The problem of solid municipal wastes utilization and impossibility to recycle them completely in Russia is considered. One of the problems is an increase in a probability of people poisoning in the settlements situated in the vicinity of such dumps as a result of fires due to an increase of packaging products in the morphological composition of solid municipal wastes that emit hazardous chemical substances in the course of combustion. The analysis of existing methods of prognostication of consequences of fires at disposal sites and landfills with solid wastes is considered and the prognostication method on the basis of the known OND-86 is offered. This method enables to determine the zone of toxic contamination in case of fires at disposal sites with solid wastes with an allowance for possible more reliable quantitative and qualitative composition of solid wastes. Calculations on determination of toxic contamination zones in case of fires at a landfill with solid municipal wastes according to the proposed methodology are given and the obtained overestimated results are shown when using the initial data on determination of the mass emission of hazardous chemical substances of the existing regulatory documents. The proposed methodology makes it possible to calculate stacking methods that provide the lowest yield of hazardous chemical substances in fires at solid waste landfills.

Keywords: solid municipal waste, hazardous chemicals, toxic air contamination zone, concentration of hazardous chemicals, threshold contamination depth

For citation: Savchuk O.N. Improving the methodology of predicting toxic contamination zones in cases of fire at solid municipal waste landfills // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 2 (66). P. 176–187.

Введение

Антропогенное воздействие на природу имеет тенденцию возрастания в XXI в. Это обусловлено ростом численности населения на планете, которое все в больших масштабах использует дары природы в целях поддержания своей жизнеспособности, урбанизацией, интенсивной разработкой и потреблением полезных ископаемых, количественным ростом промышленности и транспорта, приводящим к выбросам в окружающую среду вредных газов и отходов.

В ряду антропогенного воздействия на природу существенным фактором является рост объемов твердых коммунальных отходов (ТКО). Это приводит к проблеме выбора мест складирования таких отходов в условиях роста числа мегаполисов, которые могут занимать значительные площади на территории регионов. По оценке экспертов [1] в мире объем ТКО составляет более 1 млрд м³/год, ежегодно мировой прирост ТКО составляет около 2 %. Только в России производится ТКО около 70 млн т, ежегодный прирост составляет около 5 %, на каждого жителя в нашей стране приходится до 400 кг в год [2]. В России на площади до 4 млн га размещены около 15 тыс. полигонов, на которых накоплено за прошедшие годы более 30 млрд т отходов производства и потребления [2]. Проблема утилизации и захоронения

ТКО в России состоит еще и в том, что только 4 % ТКО перерабатывается на мусороперерабатывающих предприятиях, а до 25 % ТКО невозможно переработать. Изменение характера жизни человека, услуг в XXI в. привело к росту в составе ТКО упаковочных изделий в основном из пластика и полиэтиленовой пленки. При возгорании в таком составе ТКО в атмосферу могут выделяться токсические вещества, к которым относятся в основном: оксид углерода, цианистый водород, хлористый водород, оксиды азота, акролеин, ацетонитрил, которые представляют угрозу жизни и здоровью людей [3]. При пожарах отравление людей в населенных пунктах, расположенных вблизи полигонов, возрастает из-за расширения номенклатуры и объемов использования полимерных материалов в бытовых изделиях [4]. В связи с этим целью данной работы является обеспечение экологической безопасности населения путем разработки и совершенствования методики прогнозирования последствий пожаров на полигонах и санкционированных свалках ТКО, получение более достоверных параметров распространения токсического облака и назначения безопасной зоны удаления от населенных пунктов с учетом накопления объемов ТКО.

Анализ существующих методик прогнозирования последствий при возгорании ТКО и их совершенствование

В настоящее время при выборе мест полигонов ТКО проектируемых объемов размещения их на соответствующих площадях с учетом складирования руководствуются следующими нормативными документами: «Временные рекомендации по расчету выбросов вредных веществ в атмосферу в результате сгорания на полигонах ТБО и размера предъявляемого иска за загрязнение атмосферного воздуха», «Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов ТБО» [5, 6]. В работах по разработке методик оценки экологического риска при горении ТКО [7–10] расчет ущерба определяется по массе выброшенных при пожаре токсических веществ. Расчет массы выброса токсических веществ при сгорании ТКО ведется сугубо ориентировочно, руководствуясь рекомендациями [5] с учетом плотности размещения ТКО $0,25 \text{ т/м}^3$ и удельного выброса вредных веществ при сгорании 1 т ТКО с установленной платой за количество i -го выброса вредного вещества по формуле:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i * Q,$$

где M – суммарная масса выброса вредных веществ, т; m_i – удельный выброс i -го вредного вещества ТКО, т/т; Q – количество сгоревшего или прогнозируемого количества ТКО, т.

Однако следует при прогнозировании последствий возгораний ТКО на полигонах получать более достоверную информацию по зоне распространения токсического загрязнения с учетом реального содержания состава ТКО, высоты и площади укладки ТКО.

Для решения данной проблемы предлагается использовать методику [11], разработанную на основе известной по расчету концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ [12]. Однако следует отметить особенности прогнозирования последствий возгораний ТКО на полигонах в зависимости от характера инициирования возгораний. В случаях самовоспламенения в результате тепловой химической реакции окисления органических веществ ТКО происходит тление в глубине захоронения с температурой до $155 \text{ }^\circ\text{C}$, а при наружном возгорании в случае молнии, поджога или несоблюдения правил противопожарной безопасности температура может достигать до $880 \text{ }^\circ\text{C}$. Кроме того, следует учитывать процентное компонентное содержание ТКО и его морфологический состав, а также знать количественный выход опасных химических веществ (ОХВ) при сгорании компонентов ТКО (табл. 2.1 в монографии [11]).

Расчет глубины порогового заражения при возгорании компонентов ТКО можно проводить ориентировочно по преобладающему компоненту ТКО или с учетом процентного содержания известных компонентов и предлагается осуществлять на основе определения

максимального значения приземной концентрации ОХВ, образующихся при сгорании компонентов ТКО. Расчет предлагается проводить по формуле [12]:

$$C_M = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \frac{A \cdot M_{ij}^{am} \cdot F^* \cdot m^2 \cdot n^2 \cdot \eta_p}{H_e^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы; M_{ij}^{am} – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени (г/с); F^* – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседающих вредных веществ в атмосферном воздухе; m^2 и n^2 – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса; H_e – высота источника выброса над уровнем земли (для наземных источников при расчетах принимается $H_e=2$ м); η_p – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км, $\eta_p=1$, в остальных случаях определяется по таблице; ΔT – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси T_z и температурой окружающего атмосферного воздуха T_B ($^{\circ}\text{C}$).

$$M_{ij}^{am} = Q_j^{cz} \cdot m_{ij}^{vo} \cdot S_{0\text{выг}j}, \quad (2)$$

где M_{ij}^{am} – масса i -го ОХВ, выбрасываемая в атмосферу в единицу времени при сгорании j -го материала; Q_j^{cz} – скорость выгорания j -го материала, определяется по табл. 2.1 работы (кг/м²·мин) [11]; m_{ij}^{vo} – удельный выход i -го ОХВ при сгорании j -го материала, определяется по табл. 2.1 монографии (мг/г_ж) [11]; $S_{0\text{выг}j}$ – площадь выгорания j -го материала в начальный период (м²), которая будет зависеть от конфигурации укладки j -го материала и в упрощенном варианте может быть определена как:

$$S_{0\text{выг}j} = \frac{Q_{0j}^*}{\rho_j \cdot h_{ук}} + 2 (\text{хук} \cdot l_{ук} + \text{хук} \cdot \text{Ш}_{ук}), \quad (3)$$

где Q_{0j}^* – первоначальная масса j -го материала, т; ρ_j – плотность j -го материала, т/м³; $h_{ук}$ – высота укладки j -го материала, м; $l_{ук}$ – длина укладки j -го материала, м; $\text{Ш}_{ук}$ – ширина укладки, м; V_1 – расход газовой смеси, определяемой по формуле:

$$V_1 = 0,3 \cdot S_{\text{выб}}, \quad (4)$$

где $S_{\text{выб}}$ – площадь источника выброса образующихся ОХВ (суммарная площадь захоронения ТКО, на котором произошло возгорание материалов).

Значения безразмерных коэффициентов m^2 и n^2 определяются в зависимости от параметров f , \mathcal{G}_m , \mathcal{G}'_m и f_e [12]. С учетом условий образования ОХВ при пожаре на полигонах с ТКО значения коэффициентов f , m^2 и n^2 определяются по формулам:

$$f = 1000 \cdot \frac{\omega_o^2 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{ВЫБ}}}{\pi}}}{H_e^2 \cdot \Delta T} \quad (\text{безразмерный}); \quad (5)$$

$$m^2 = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f}} \quad \text{при } f < 100;$$

$$n^2 = 1 \text{ при } \mathcal{G}_M \geq 2.$$

С учетом значений коэффициентов f , m^2 и n^2 формулу (1) можно представить в виде:

$$C_M = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \frac{A \cdot M^{am_{ij}} \cdot \eta_p}{H_g^2 \cdot \sqrt[3]{V_1} \cdot \Delta T \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f})}, \quad (6)$$

так как согласно [11] для газообразных веществ $F^* = 1$.

Принимая наихудшие условия при скорости ветра U и неблагоприятных метеоусловиях, концентрации ОХВ, достигающей максимального значения C_{MU} , удаление X_M (M) от источника пожара определяется по формуле:

$$X_{MU} = 3 \cdot d^* \cdot H_g. \quad (7)$$

Концентрация C_{U_M} наземного источника (H_g менее 10 м) по направлению выброса при опасной скорости ветра U_M при значениях $X/X_M \leq 1$ на удалениях X от него определяется по формуле:

$$C_{U_M} = C_M \cdot S_1^H,$$

где S_1^H – коэффициент, рассчитываемый в зависимости от отношения X/X_M и H по формуле:

$$S_1^H = 0,125 \cdot (10 - H_g) + 0,125 \cdot (H_g - 2) \cdot S_1$$

при $2 \leq H < 10$;

$$S_1 = 3 \cdot (X/X_M)^4 - 8 \cdot (X/X_M)^3 + 6 \cdot (X/X_M)^2$$

при $X/X_M \leq 1$.

Концентрация ОХВ C_y на расстоянии y (M) перпендикулярно к оси направления выброса будет определяться по формуле:

$$C_y = S_2 \cdot C_{MU}, \quad (8)$$

где S_2 – коэффициент, рассчитываемый в зависимости от скорости ветра U и отношения y/x по значению t_y по формуле:

$$S_2 = \frac{1}{(1 + 5 \cdot t_y + 12,8 \cdot t_y^2 + 17 \cdot t_y^3 + 45,1 \cdot t_y^4)^2},$$

где $t_y = \frac{U \cdot y^2}{x^2}$ при $U \leq 5$; $t_y = \frac{5 \cdot y^2}{x^2}$ при $U > 5$.

Определение суммарной концентрации ОХВ по формуле (6) не дает возможности определения глубины зоны токсического загрязнения, так как нет нормативных данных по ПДК суммарной концентрации различных ОХВ [13], образующихся при сгорании ТКО.

Поэтому предлагается вести расчет C_M по каждому из образующихся ОХВ при сгорании k материалов, а затем рассчитать приведенную суммарную концентрацию к одному из N опасных химических веществ [11], то есть:

$$C_{Mnn}^1 = C_M^1 + C_M^2 \cdot \frac{ПДК_1}{ПДК_2} + \dots + C_M^N \cdot \frac{ПДК_1}{ПДК_N}. \quad (9)$$

В большинстве случаев целесообразно расчет C_{Mnn}^1 осуществлять по приведению к концентрации окиси углерода СО остальных образующихся ОХВ при сгорании материалов, так как согласно [14] можно определить значение средней смертельной концентрации C_{L50} по формуле на любое время экспозиции:

$$C_{cm} = C_{L50} = 4,502 + 22,292/\tau \text{ мг/л}, \quad (10)$$

где τ – время экспозиции в мин; пороговое значение C_n^{co} определяется как $C_{cm}/3,8$.

Максимальное значение концентрации C_{MU} при неблагоприятных метеоусловиях и скорости ветра U на расстоянии X_M определяется по формуле:

$$C_{MU} = [0,67 \cdot (U/U_M) + 1,67 \cdot (U/U_M)^2 - 1,34(U/U_M)^3] \cdot C_{Mnp}^1. \quad (11)$$

Учитывая изменения концентрации при прохождении облака по закону Гаусса и используя известное соотношение [15]:

$$C_x = C_M \exp[-(X/\Gamma_{nop}) \text{Ln}(C_M/C_n)],$$

где C_x – концентрация на расстоянии X от рассматриваемой точки до очага пожара, мг/л; Γ_{nop} – глубина зоны заражения, м; C_M – концентрация в очаге пожара, мг/л; C_n , C_{cm} – значения пороговой и смертельной концентрации, определяемые в общем случае как $D_n/30$ для экспозиции до 2 ч [15], можно определить глубину заражения при неблагоприятных метеоусловиях, с учетом формулы (9), как:

$$\Gamma_{nop} = \frac{3d^* \cdot H_e \cdot \text{Ln} \frac{C_M}{C_n}}{\text{Ln} \frac{C_M}{C_{MU}}}. \quad (12)$$

Ориентировочно угол распространения образующихся ОХВ при пожаре ТКО определяется по табл. 1.

Таблица 1

Ориентировочное значение угла распространения образующихся ОХВ при пожаре ТКО

Скорость ветра м/с	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10–15
φ град	93	62	43	34	28	26	26	26	26	26	26

Проведем ориентировочный расчет параметров пороговой зоны токсического распространения заражения воздуха при пожаре на полигоне захоронения ТКО по предлагаемой методике на примере: произошло возгорание на участке полигона ТКО на площади 100 м^2 , где согласно Инструкции по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов ТБО [16] было захоронено 170 т ТКО ($\rho_{\text{ТКО}} = 0,85 \frac{\text{т}}{\text{м}^3}$) с высотой укладки $h_{\text{ук}}=2 \text{ м}$, укрытой изолирующим слоем грунта $0,15 \text{ м}$ при уплотнении его, $l_{\text{ук}}=10 \text{ м}$, $\text{Ш}=10 \text{ м}$, $S_{\text{выг}}=90 \text{ м}^2$, $S_{\text{выб}}=50 \text{ м}^2$, среднюю скорость выхода газовой смеси принимаем $\omega_0 = 0,3 \text{ м/с}$, температура пожара равна $880 \text{ }^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $+ 20 \text{ }^\circ\text{C}$, высота выброса $H=3 \text{ м}$, местность слабо пересеченная $\eta_p = 1$, скорость ветра $u=2 \text{ м/с}$. В связи с трудностями в точной оценке морфологического состава ТКО примем среднестатистическую долю целлюлозы в ее составе 50% [17], а также долю первоначального возгорания количества ТКО – 10% .

Согласно формуле (6) определяем максимальное значение концентрации ОХВ, образующихся при сгорании целлюлозы. При горении целлюлозы (табл. 2.1 [11]) образуются следующие значимые ОХВ: оксид углерода CO , цианистый водород HCN , акролеин CH_2 , формальдегид CH_2O .

Вначале определяем массу этих ОХВ, выбрасываемых в атмосферу в единицу времени, согласно формуле (2):

$$M_{co}^u = \frac{90 \cdot 270 \cdot 0,64}{60} = 259,2 \text{ г/с};$$

$$M_{HCN}^u = \frac{90 \cdot 0,74 \cdot 0,64}{60} = 0,71 \text{ г/с};$$

$$M_{CH_2O}^u = \frac{90 \cdot 0,2 \cdot 0,64}{60} = 0,19 \text{ г/с};$$

$$M_{CH_2}^u = \frac{90 \cdot 9,5 \cdot 0,64}{60} = 9,12 \text{ г/с}.$$

Согласно работе [12] значение коэффициента $A=160$; по формуле (4) $V_I = 100 \cdot 0,3 = 30 \text{ м}^3/\text{с}$; $\Delta T = 880 - 20 = 860 \text{ }^\circ\text{C}$; по формуле (3) $S_{\text{выг}}=90 \text{ м}^2$; по формуле (5):

$$f = 1000 \cdot \frac{0,3^2 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 50}{3,14}}}{9 \cdot 860} = 0,093, \quad \eta_p = 1,$$

так как местность пересеченная.

$$C_{M_u}^{CO} = \frac{160 \cdot 259,2 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{30 \cdot 860} \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{0,093} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{0,093})} = 182,5^3 \text{ г/м}^3,$$

$$C_{M_u}^{HCN} = \frac{160 \cdot 0,71 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{30 \cdot 860} \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{0,093} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{0,093})} = 0,54 \text{ г/с};$$

$$C_{M_u}^{CH_2O} = \frac{160 \cdot 0,19 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{30 \cdot 860} \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{0,093} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{0,093})} = 0,134 \text{ г/с};$$

$$C^{CH_2} = \frac{160 \cdot 9,12 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{30 \cdot 860} \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{0,093} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{0,093})} = 6,42 \text{ г/м}^3.$$

Согласно формуле (9):

$$C_{Mu} = 182,5 + 0,54 \cdot \frac{10}{0,2} + 0,134 \cdot \frac{10}{0,6} + 6,42 \cdot \frac{10}{0,2} = 532,73 \text{ г/м}^3 = 532,73 \text{ мг/л.}$$

Расстояние X_M от источника выброса, на котором C_M достигает максимального значения при неблагоприятных метеоусловиях, согласно формуле (7), будет равно:

$$X_M = 3 \cdot d^* \cdot H_e = 3 \cdot 28,76 \cdot 3 = 258,8 \text{ м};$$

$$d^* = 7 \cdot \sqrt{v_M} \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}) = 7 \cdot \sqrt{13,32} (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{0,093}) = 28,76;$$

$$v_M = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}} = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{30 \cdot 860}{3}} = 13,32.$$

Значения концентрации пороговой C_n и смертельной концентрации C_{cm} определяем по формуле (10) с учетом $\tau = 10$ мин как:

$$C_n = PC_{t_{50}}^{co} = 6,73/3,8 = 1,77 \text{ мг/л}; C_{cm} = LC_{t_{50}}^{co} = 4,502 + 22,292/10 = 6,73 \text{ мг/л.}$$

Согласно формуле (12) определяем глубину порогового токсического заражения на открытой местности:

$$\Gamma_{nop} = \frac{3 \cdot 28,76 \cdot 3 \cdot Ln \frac{532,73}{1,77}}{Ln \frac{532,73}{68,19}} = 694,3 \text{ м.}$$

Угол распространения ОХВ при пожаре ТКО $\varphi = 43^\circ$ (табл. 1).

В целях более достоверного определения глубины порогового токсического заражения при пожаре на полигоне захоронения ТКО проведем расчет с учетом процентного содержания компонентов ТКО по статистическим данным Московской академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова [17] с условиями приведенного выше примера: состав ТКО (бумага, картон – 30 %, дерево – 20 %, текстиль – 7 %, пластмасса – 5 %, пищевые отходы – 38 %); доля первоначального возгорания количества ТКО 10 %. При возгорании этих компонентов ТКО образуются ОХВ с количественными характеристиками выхода вещества, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Количественные характеристики выхода ОХВ рассматриваемых компонентов ТКО

Наименование компонента ТКО	Угарный газ СО, мг/г	Цианистый водород HCN, мг/г	Формальдегид СН ₂ О, мг/г	Акролеин СН ₂ , мг/г
Бумага, картон	211	0,15	0,22	2,17
Древесина	179	–	0,07	3,65
Пластмасса	104,2	6,7	–	–
Текстиль	5,2	–	–	–

Определяем массу этих ОХВ, выбрасываемых в атмосферу в единицу времени:

$$\sum M_{co}^u = \frac{83 \cdot 211 \cdot 0,61}{60} + \frac{82 \cdot 179 \cdot 0,4}{60} + \frac{80,5 \cdot 104,2 \cdot 0,168}{60} + \frac{80,7 \cdot 5,2 \cdot 1,3}{60} = 308,46 \text{ г/с};$$

$$\sum M_{HCN}^u = \frac{83 \cdot 0,15 \cdot 0,61}{60} + \frac{80,5 \cdot 6,7 \cdot 0,168}{60} = 1,64 \text{ г/с};$$

$$\sum M_{CH_2O}^u = \frac{83 \cdot 0,22 \cdot 0,61}{60} + \frac{82 \cdot 0,07 \cdot 0,4}{60} = 0,224 \text{ г/с};$$

$$\sum M_{CH_2}^u = \frac{83 \cdot 2,17 \cdot 0,61}{60} + \frac{82 \cdot 3,65 \cdot 0,4}{60} = 3,83 \text{ г/с};$$

$$C_{M_{co}}^{co} = \frac{160 \cdot 308,46 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{30 \cdot 860 \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{0,093} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{0,093})}} = 217,18 \text{ г/м}^3;$$

$$C_{M_{HCN}}^{HCN} = \frac{160 \cdot 1,64 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{30 \cdot 860 \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{0,093} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{0,093})}} = 1,155 \text{ г/с};$$

$$C_{M_{CH_2O}}^{CH_2O} = \frac{160 \cdot 0,224 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{30 \cdot 860 \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{0,093} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{0,093})}} = 0,158 \text{ г/с};$$

$$C^{CH_2} = \frac{160 \cdot 3,83 \cdot 1}{9 \cdot \sqrt[3]{30 \cdot 860 \cdot (0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{0,093} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{0,093})}} = 2,7 \text{ г/м}^3.$$

Согласно формуле (9):

$$C_{M_{co}} = 217,18 + 1,15 \cdot \frac{10}{0,2} + 0,158 \cdot \frac{10}{0,6} + 2,7 \cdot \frac{10}{0,2} = 412,31 \text{ г/м}^3 = 412,31 \text{ мг/л}.$$

Согласно формуле (11):

$$C_{MU} = C_{M_{co}} \cdot \left[0,67 \cdot \left(\frac{U}{U_M} \right) + 1,67 \cdot \left(\frac{U}{U_M} \right)^2 - 1,34 \cdot \left(\frac{U}{U_M} \right)^3 \right] = 52,76 \text{ мг/л}$$

при $U = 2 \text{ м/с}$ и согласно (8) $U_M = \vartheta_M \cdot (1 + 0,12 \cdot \sqrt{f}) \approx 13,8 \text{ м/с}$.

Согласно формуле (12) определяем глубину порогового токсического заражения на открытой местности:

$$\Gamma_{nop} = \frac{3 \cdot 28,76 \cdot 3 \text{Ln} \frac{412,31}{1,77}}{\text{Ln} \frac{412,31}{52,76}} = 686,2 \text{ м}.$$

Заключение

Расчеты показывают, что использование ориентировочных данных по удельному выходу ОХВ при пожаре ТКО для определения зон токсического заражения согласно [5] часто приводит к завышенным результатам их определения. Целесообразно уточнять эти данные в связи с происшедшим качественным и количественным морфологическим составом ТКО в настоящее время. Расчеты в приведенных примерах показывают о преобладании выделяемых ОХВ целлюлозой в составе ТКО при пожаре. Предлагаемая усовершенствованная методика прогнозирования позволяет более достоверно определять границы зон токсического заражения ОХВ при пожарах на полигонах ТКО при уточнении данных по составу ТКО. Это можно обеспечить путем должной организации и учета захоронения отдельных компонентов ТКО. Усовершенствованная методика также позволяет рассчитывать параметры способов укладки, обеспечивающие наименьший выход ОХВ при пожарах на полигонах ТКО.

Список источников

1. Витковская С.Е. Твердые бытовые отходы: антропогенное звено биологического круговорота: монография. СПб.: АФИ, 2012. 132 с.
2. Беляева М. Нет отходов – есть сырье // Аргументы и факты. 2021. № 47.
3. Оценка воздействия факторов пожара в токсикологическом эксперименте. Пожарная профилактика: сб. науч. трудов / И.В. Гусев [и др.]. Л.: ВНИИПО МЧС России, 1986. С. 12.
4. Брусницына М.А. Отравление цианидами при токсико-дымовом поражении людей на пожаре // Украинский медицинский журнал online. 2002. № 5 (31).
5. Временные рекомендации по расчету выбросов вредных веществ в атмосферу в результате сгорания на полигонах ТБО и размера предъявляемого иска за загрязнение атмосферного воздуха (утв. Министерством экологии и природных ресурсов Рос. Федерации 2 нояб. 1992 г.) // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 16.12.2022).
6. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов ТБО (утв. Министерством строительства Рос. Федерации от 2 нояб. 1996 г.) // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 18.12.2022).
7. Рябов Ю.В. Разработка универсальной методики расчета экологического риска возникновения пожара на несанкционированных свалках. СПб.: Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, 2011. 18 с.
8. Слюсарь Н.Н. Использование результатов оценки экологического риска для разработки программ вывода из эксплуатации старых свалок // Вестник МГСУ. 2016. № 8. С. 88–99.
9. Allgaier G., Ritzkowski M., Stegmann R. Risk assessment of small old landfills: the EVAPASSOLD model. URL: <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=13069> (дата обращения: 24.04.2022).
10. Small landfill closure criteria – Risk assessment for small closed landfills. URL: www.mfe.govt.nz/sites/default/files/small-landfill-closure-dec02.pdf (дата обращения: 24.04.2022).
11. Обеспечение химической безопасности в случае пожара и аварий на объектах транспортной инфраструктуры: монография / О.Н. Савчук [и др.]. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2017. 257 с.
12. Методика расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе (утв. Министерством природных ресурсов и экологии Рос. Федерации № 273 от 6 июня 2017 г.) // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 18.12.2022).
13. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (доп. и перераб.). СПб.: НИИ Атмосферы. Министерство природных ресурсов Российской Федерации, 2005. 145 с.

14. Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П. Энциклопедия безопасности. Строительство. Промышленность. Экология: в 3 т. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов. Т. 2: Законы поражения. Прочность и динамика сооружений, 2008. 632 с.
15. Маньков В.Д. Безопасность общества и человека в современном мире: учеб. пособие для технических вузов. СПб.: Изд-во Политехника, 2005. 551 с.
16. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов ТБО (утв. Министерством строительства Российской Федерации от 2 нояб. 1996 г.).
17. Твердые бытовые отходы (сбор, транспортировка и обезвреживание) / В.Г. Систер [и др.]: справ. М.: АКХ им. К.Д. Памфиловой, 2001. 235 с.

References

1. Vitkovskaya S.E. Tverdye bytovye othody: antropogennoe zveno biologicheskogo krugovorota: monografiya. SPb.: AFI, 2012. 132 s.
2. Belyaeva M. Net othodov – est' syr'e // Argumenty i fakty. 2021. № 47.
3. Ocenka vozdeystviya faktorov pozhara v toksikologicheskom eksperimente. Pozharnaya profilaktika: sb. nauch. trudov / I.V. Gusev [i dr.]. L.: VNIPO MCHS Rossii, 1986. S. 12.
4. Brusnicyna M.A Otravlenie cianidami pri toksiko-dymovom porazhenii lyudej na pozhare // Ukrainskij medicinskij zhurnal online. 2002. № 5 (31).
5. Vremennye rekomendacii po raschetu vybrosov vrednyh veshchestv v atmosferu v rezul'tate sgoraniya na poligonah TBO i razmera pred'yavlyаемого iska za zagryaznenie atmosfernogo vozduha (utv. Ministerstvom ekologii i prirodnyh resursov Ros. Federacii 2 noyab. 1992 g.) // Oficial'nyj internet-portal pravovoj informacii. URL: <http://pravo.gov.ru> (data obrashcheniya: 16.12.2022).
6. Instrukciya po proektirovaniyu, ekspluatatsii i rekul'tivacii poligonov TBO (utv. Ministerstvom stroitel'stva Ros. Federacii ot 2 noyab. 1996 g.) // Elektronnyj fond pravovoj i normativno-tekhnicheckoj dokumentacii. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (data obrashcheniya: 18.12.2022).
7. Ryabov Yu.V. Razrabotka universal'noj metodiki rascheta ekologicheskogo riska vozniknoveniya pozhara na nesankcionirovannyh svalkah. SPb.: Nauchno-issledovatel'skij centr ekologicheskoy bezopasnosti RAN, 2011. 18 s.
8. Slyusar' N.N. Ispol'zovanie rezul'tatov ocenki ekologicheskogo riska dlya razrabotki programm vyvoda iz ekspluatatsii staryh svalok // Vestnik MGSU. 2016. № 8. S. 88–99.
9. Allgaier G., Ritzkowski M., Stegmann R. Risk assessment of small old landfills: the EVAPASSOLD model. URL: <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=13069> (data obrashcheniya: 24.04.2022).
10. Small landfill closure criteria – Risk assessment for small closed landfills. URL: www.mfe.govt.nz/sites/default/files/small-landfill-closure-dec02.pdf (data obrashcheniya: 24.04.2022).
11. Obespechenie himicheskoy bezopasnosti v sluchae pozhara i avarij na ob'ektah transportnoj infrastruktury: monografiya / O.N. Savchuk [i dr.]. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2017. 257 s.
12. Metodika rascheta rasseivaniya vybrosov vrednyh (zagryaznyayushchih) veshchestv v atmosfernom vozduhe (utv. Ministerstvom prirodnyh resursov i ekologii Ros. Federacii № 273 ot 6 iyunya 2017 g.) // Elektronnyj fond pravovoj i normativno-tekhnicheckoj dokumentacii. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (data obrashcheniya: 18.12.2022).
13. Metodicheskoe posobie po raschetu, normirovaniyu i kontrolyu vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernyj vozduh (dop. i pererab.). SPb.: NII Atmosfery. Ministerstvo prirodnyh resursov Rossijskoj Federacii, 2005. 145 s.
14. Kotlyarevskij V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. Enciklopediya bezopasnosti. Stroitel'stvo. Promyshlennost'. Ekologiya: v 3 t. M.: Izd-vo Associacii stroitel'nyh vuzov. T. 2: Zakony porazheniya. Prochnost' i dinamika sooruzhenij, 2008. 632 s.
15. Man'kov V.D. Bezopasnost' obshchestva i cheloveka v sovremennom mire: ucheb. posobie dlya tekhnicheskikh vuzov. SPb.: Izd-vo Politekhnik, 2005. 551 s.

16. Instrukciya po proektirovaniyu, ekspluatacii i rekul'tivacii poligonov TBO (utv. Ministerstvom stroitel'stva Rossijskoj Federacii ot 2 noyab. 1996 g.).

17. Tverdye bytovye othody (sbor, transportirovka i obezvrezhivanie) / V.G. Sister [i dr.]: sprav. M.: AKKH im. K.D. Pamfilovoj, 2001. 235 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 24.01.2023; одобрена после рецензирования: 21.03.2023; принята к публикации: 25.03.2023

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 24.01.2023; approved after review: 21.03.2023; accepted for publication: 25.03.2023

Информация об авторах:

Савчук Олег Николаевич, профессор кафедры сервис безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, e-mail: sb@igps.ru, oleg-savcuk@mail.ru

Information about the authors:

Savchuk Oleg N., professor of the department of security service of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, professor, honored worker of the higher school of the Russian Federation, e-mail: sb@igps.ru, oleg-savcuk@mail.ru