УДК 504.064.2.001.18 *ISSN 1609-0683*
DOI: https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/2/127-133

Обеспечение экологической безопасности полигонов твердых коммунальных отходов на основе расчетов параметров объемных пожаров с использованием модели тепломассопереноса

Е. С. Андреева ✉

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация
(344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

Аннотация. *Цель* – обеспечение экологической безопасности полигонов твердых коммунальных отходов на основе адаптации уравнений тепломассопереноса для математического моделирования параметров опасных объемных пожаров, стремительное развитие которых обусловливает высокий уровень загрязнения воздуха, повышая экологические риски.

Материалы и методы. Для математического описания процессов возгорания в слоях отходов и дальнейшего развития горения в приземном слое воздуха применялась многокомпонентная модель тепломассопереноса, учитывающая тепловое преобразование вещества, влажность и температуру среды, а также горизонтальную и вертикальную скорости воздушного переноса. Для учета вклада вертикальной тепловой диффузной конвекции использовалась уточненная формула Р. Ротермела. Математическая задача замыкалась на основе гипотезы Монина-Обухова, в цилиндрической системе координат.

Результаты и обсуждение. Описаны физические процессы, способствующие воспламенению в слое отходов, а также параметры, характеризующие очаги горения в поверхностном слое отходов и особенности развития огневого процесса по вертикали при тепловой турбулентной конвекции. Описаны начальные и граничные условия объемных пожаров на основе принципов тепломассообмена.

Выводы. Для предупреждения развития объемных пожаров в слое отходов предусматривается разработка ряда мероприятий, направленных на послойное складирование отходов с обязательным их уплотнением для исключения образования полостей с концентрацией биогаза, внедрение системы вертикальных скважин газоотведения с последующей его утилизацией, что обеспечит повышение экологической и пожарной безопасности полигонов с учетом полученных в работе параметров и взаимосвязей между ними.

***Ключевые слова*:** твердые коммунальные отходы, модель тепломассопереноса, тепловая конвекция; экологическая безопасность полигонов твердых коммунальных отходов, рекомендации по предупреждению развития объемных пожаров в слоях твердых коммунальных отходов.

Для цитирования: Андреева Е. С. Обеспечение экологической безопасности полигонов твердых коммунальных отходов на основе расчетов параметров объемных пожаров с использованием модели тепломассопереноса // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2026, № 2, с. 127-133. DOI: https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/2/127-133

ВВЕДЕНИЕ

Существенно снижают экологическую безопасность населения, проживающего вблизи полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО), возгорания, возникающие в слоях отходов и стремительно преобразующиеся под воздействием ряда физических факторов среды [1] в опасные объемные пожары, актуализируя идею данного исследования. Так, за несколько месяцев 2026 г. по данным МЧС России установлен значительный рост числа пожаров на полигонах отходов по сравнению с предыдущими годами, при этом до 80 % возгораний обусловливались засушливыми погодными условиями. Важно отметить, что тление и открытое горение твердых коммунальных отходов обеспечивает поступление в воздушный слой сложного и крайнего токсичного комплекса веществ, в числе которых особую роль выполняют сажевые частицы, являясь с 2012 г. по данным Международного агентства исследования рака (МАИР) канцерогенными. Вместе с тем, параметризация подобных объемных пожаров, а также их корректное математическое описание в настоящее время отсутствуют.

Однако для разработки природоохранных решений необходимо опираться на полное техническое описание параметров, способствующих преобразованию горизонтальных огневых потоков горящего вещества в вертикальные, экспериментальное исследование которых затруднено в лабораторных или полевых условиях. Данные обстоятельства обусловили необходимость

© Андреева Е. С., 2026
✉ Андреева Елена Сергеевна, e-mail: meteo0717@yandex.ru
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

применения имитационного математического моделирования, основанного на уравнениях тепломассопереноса, ввиду нелинейности процессов преобразования вещества и перераспределения тепла при возникновении и развитии процесса горения на полигонах.

Целью данного исследования является обеспечение экологической безопасности полигонов твердых коммунальных отходов на основе использования уравнений тепломассопереноса для математического моделирования параметров опасных объемных пожаров, стремительное развитие которых обусловливает значительное загрязнение воздуха, повышая экологические риски для здоровья населения, проживающего вблизи полигонов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для описания процессов, возникающих в результате тепловой конвекции [2, 4-6] в поверхностных слоях ТКО, использована многокомпонентная модель тепломассопереноса, базирующаяся на учете преобразования вещества, вызванного сочетанием значений температуры, влажности среды, а также конвективной скорости воздушного переноса. Массу отходов коммунального хозяйства при этом будем считать квазиоднородным изотропным пористым телом с характерными теплофизическими свойствами, зависящими, главным образом, от температуры и влажности [3, 5]. Для выявления критических значений описываемых параметров – температура и влажность сред, скорость переноса, интенсивность термической диффузной конвекции – применена уточненная модель Р. Ротермела. Расчеты экологических рисков здоровью осуществлялись на основе значений среднегодовых и максимально-разовых концентраций сажевых частиц в воздухе по данным Ежегодников состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России, изданных Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова за 2015-2024 гг.[1]

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Постановка задачи. Для оценки экологических рисков канцерогенного характера, обусловленных присутствием сажевых частиц в воздухе, рассматривались случаи крупных пожаров за 2015-2024 гг., произошедших на территории Российской Федерации (РФ). Так, по результатам расчетов удалось установить, что при пожарах, площадью в 1 га (10 000 км^2), концентрация сажевых частиц достигала 24 мкг/м^3, возрастая по сравнению с периодами без крупных пожаров практически в 1,5 раза. Уровень канцерогенного риска аэрогенного характера при этом превышал установленный Роспотребнадзором РФ норматив приемлемого риска более чем в 10 раз[2].

По этой причине в данном исследовании рассматриваются объемные пожары, образованные очагами возгорания [1, 2, 4-6] на поверхности слоя твердых коммунальных отходов и развивающиеся в приземном слое воздуха из-за вынужденной тепловой конвекции, усиливающейся турбулентными движениями воздушных потоков. Для замыкания системы уравнений модели использовалась гипотеза подобия Монина – Обухова, дающая возможность оценивать численные характеристики в пределах нестационарного по Д. Л. Лайхтману [2] приземного слоя воздуха. Граничные и начальные условия для расчета параметров исследуемых пожаров будем считать параметрами тепломассопереноса, возникающими на границе сред «поверхностный слой отходов – приземный слой воздуха»; они заданы в работе для решения соответствующих уравнений. Процессы передачи тепла вглубь слоя отходов не рассматриваются. Форму очага и дальнейшего огневого потока, развивающегося по вертикали, будем описывать в цилиндрической системе координат.

Описание уравнений модели. Уравнение теплопереноса по вертикали позволяет моделировать перенос тепла по вертикали в условиях пожара при однотемпературных условиях, возникшего на поверхности твердых коммунальных отходов (формулы 1, 2):

$$\frac{dT}{dt}=\frac{\partial T}{\partial t}+u_z\frac{\partial T}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z(z)\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\frac{Q(z,t)}{\rho_w c_p}. \quad (1)$$

С учетом затрат тепла на испарение влаги, содержащейся в поверхностном слое отходов, запишем:

$$\frac{dT}{dt}=\frac{\partial T}{\partial t}+u_z\frac{\partial T}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z(z)\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\frac{Q(z,t)}{\rho_w c_p}-Q_{исп},$$

$$Q_{исп}=\dot{m}_{исп}\cdot L, \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt}=\frac{\partial T}{\partial t}+u_z\frac{\partial T}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z(z)\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\frac{Q(z,t)}{\rho_w c_p}-\left(\dot{m}_{исп}\cdot L\right)$$

где Q – мощность источника тепла (очага горения), зависит массового расхода твердых коммунальных отходов, $\dot{m}$, кг/с, и их низшей теплоты сгорания, Q_w, кДж/кг, рассчитывается по формуле: $Q=\dot{m}\cdot Q_w$, при этом $\dot{m}=\frac{m}{t}=\frac{V\cdot\rho_w}{t}$, здесь t – время горения, с; m – масса сгоревших твердых коммунальных отходов, кг; V – объем сгоревших отходов, м^3; значение Q_w колеблется в пределах от 4 000 до 10 000 кДж/кг; T – температура поверхностного слоя отходов, К; t – время; z – вертикальная координата, м; k_z – коэффициент вертикальной диффузии М. И. Будыко; ρ_w – истинная плотность твердых коммунальных отходов, кг/м^3; c_p – удельная теплоемкость твердых коммунальных отходов, Дж/кг · °С; $Q_{исп}$ – затраты тепла на испарение влаги, Вт/м^3; $\dot{m}_{исп}$ – массовая скорость испарения влаги, кг/м^3·с; L – удельная теплота парообразования воды, равная 2,26 ·10^6 Дж/кг.

[1] *Ежегодники состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России, изданных Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова за 2015 – 2024 гг.* – URL: http://voeikovmgo.ru/index.php/deyatelnost/publikacii/40-perechen-materialov-izdannykh-ggo (дата обращения: 10.03.2026). – Текст: электронный.

[2] *Руководство Р 2.1.10.3968-23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере здравоохранения от 05 сентября 2023 г.)*. – URL: https://base.garant.ru/408644981/ (дата обращения: 10.01.2026). – Текст: электронный.

Для оценки скорости *u* продвижения огневого потока в слое, ограниченном поверхностью отходов, заданной координатой $\bar{r}$ и высотой приземного воздуха (0-2 м), включая скорость распространения пламени в приземном слое воздуха $\omega_{\bar{r}1}$ и скорость поверхностного продвижения огня $\omega_{\bar{r}}$, возьмем за основу формулы, полученные в работе [1]: $\omega_{\bar{r}} = S\left(1+\left(k_1\cdot\rho_w\right)+\left(k_2\cdot U\right)\right)$, где $\omega_{\bar{r}}$ – скорость продвижения огня в поверхностном слое твердых коммунальных отходов, м/с; $\left(k_1\cdot\rho_w\right)$ – истинная плотность в кг/м^3 пласта твердых коммунальных отходов, м/с, с учетом эмпирической константы $k_1 = 0{,}02\frac{м^3\cdot м}{кг\cdot с}$; $k_2(U)$ – величина частичек в м^2 прогораемого слоя твердых коммунальных отходов, м/с, с учетом эмпирической константы $k = 0{,}02\frac{м}{м^2\cdot с}$; *S* – скорость полного прогорания слоя твердых коммунальных отходов, м/с; а также $\omega_{\bar{r}1}$ – скорость продвижения огня в приземном слое воздуха, м/с; $\omega_{\bar{r}1} = \omega_{\bar{r}}\cdot\left|\frac{T_0}{T_1}\right|\cdot\frac{\upsilon_0}{\upsilon_1}\cdot\frac{f_0}{f_1}$, где T_0 – температура поверхностного слоя твердых коммунальных отходов, ˚С; T_1 – температура воздуха в приземном слое, ˚С; υ_0 – скорость ветра над поверхностным слоем отходов, м/с; υ_1 – скорость ветра в приземном слое воздуха, м/с; f_0 – относительная влажность воздуха в поверхностном слое отходов, %; f_1 – относительная влажность воздуха над приземным слоем отходов, %.

Расчетную формулу для вычисления скорости продвижения огневого потока в горизонтальной плоскости по координате *r*, запишем следующим образом:

$$u_r = \omega_{\bar{r}} + \omega_{\bar{r}1}, м/с$$

а ее полная производная $\frac{du_r}{dt}$ по времени (формула 3):

$$\frac{du_r}{dt} = \frac{d}{dr}\left[k(U)+k(S)\cdot\left(1+\left|\frac{T_0}{T_1}\right|\cdot\frac{\upsilon_0}{\upsilon_1}\cdot\frac{f_0}{f_1}\right)\right] =$$

$$= \left[k'(U)\frac{dU}{dt}+k'(S)\frac{dS}{dt}\right]\cdot\left(1+\left|\frac{T_0}{T_1}\right|\cdot\frac{\upsilon_0}{\upsilon_1}\cdot\frac{f_0}{f_1}\right)+$$

$$+\left[k(U)+K(S)\right]\cdot\left|T_0\right|\cdot\upsilon_0\cdot f_0\cdot\left[-\frac{1}{\left(T_1\cdot\upsilon_1\cdot f_1\right)^2}\cdot\left(f_1\upsilon_1\frac{dT_1}{dt}+T_1\upsilon_1\frac{df_1}{dt}+T_1 f_1\frac{d\upsilon_1}{dt}\right)\right], \quad (3)$$

где *u* – скорость продвижения огневого потока по поверхности слоя отходов, м/с; $\omega_{\bar{r}1}$ – скорость продвижения огня на поверхности слоя твердых коммунальных отходов, в очаге возгорания, м/с; $\omega_{\bar{r}1}$ – скорость продвижения огня в приземном слое воздуха, м/с.

Уравнение скорости продвижения огневого потока по координате *z* (формула 4):

$$\frac{du_z}{dt} = \frac{\partial}{\partial t}\left(k_z\frac{\partial u_r}{\partial z}\right)+u_r\frac{\partial}{\partial r}\left(k_z\frac{\partial u_r}{\partial z}\right)+k_z\frac{\partial u_r}{\partial z}\frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (4)$$

где u_z – скорость продвижения огневого потока по координате z, м/с; u_r – скорость продвижения огня по координате r, м/с; k_z – коэффициент вертикальной тепловой диффузии М.И. Будыко, м^2/с, вычисляемый по формуле для учета турбулентных вихревых движений (формула 5):

$$k_z = k_{1p}\frac{z}{z_1}\sqrt{1-\overline{R_i}},$$

$$\overline{R_i} = \frac{g\frac{dT}{dz}}{T_a\left(\frac{dT}{dz}\right)^2} \quad (5)$$

здесь k_{1p} – значение коэффициента вертикальной диффузии на единичной высоте z_1 и в равновесных условиях, условно на высоте 1 м его численное значение составляет 0,1-0,2 м^2/с; R_i – среднее по пограничному слою значение числа Ричардсона, безразмерный показатель; *T* – температура воздуха, ˚С; T_a – температура воздуха, К; *g* – ускорение свободного падения, м/с^2.

Уравнение массопереноса для горючих (органических и неорганических) веществ, содержащихся в слоях твердых коммунальных отходов (формула 6):

$$\frac{dC}{dt}+u_z\frac{dC}{dz} = k_z\frac{d^2C}{dz^2}+Y\left(z,t\right), \quad (6)$$

где *C* – концентрация горючего вещества, кг/м^3; u_z – скорость продвижения огневого потока, м/с по вертикали; k_z – коэффициент вертикальной диффузии М.И. Будыко, м^2/с; *Y* – параметр очага горения, характеризует генерацию или поглощение вещества, кг/м^3·с, рассчитывается по формуле $Y = k_{био}\cdot C - k_{гор}$, $k_{био}$ – константа скорости биологического разложения твердых коммунальных отходов, $k_{био}$ ~ 0,037 до 0,072 1/год (для сухих или влажных условий); $k_{гор}$ – константа скорости выгорания твердых коммунальных отходов, $k_{гор}$ ~ 0,005 – 0,02 кг/(м^2·с).

Уравнение для оценки массопереноса поддерживающих горение кислорода O_2 и биогаза CH_4 будет выглядеть следующим образом (формула 7):

$$\frac{dC_j}{dt}+u_z\frac{d\ C_j}{dz} = k_z\frac{d^2C_j}{dz^2}R_j\left(C_{o_2},C_{CH_4},z,t\right), \quad (7)$$

где $C_j\ (z,t)$ – концентрация *j-го* компонента (под *j-м* компонентом будем понимать кислород O_2 или биогаз CH_4), содержащегося на высоте *z* в момент времени *t*, моль/м^3 или кг/м^3; u_z – скорость продвижения огневого потока, м/с по вертикали; k_z – коэффициент вертикальной диффузии М.И. Будыко, м^2/с; R_j – функция, описывающая скорость расхода кислорода O_2 или биогаза CH_4, рассчитывается по формуле $R_j = k\cdot C_{O_2}\cdot C_{CH_4}$, где *k*

– константа скорости реакции по биогазу и кислороду составляет 10^{-5} – 10^{-2} 1/с при температуре горения T = 600 – 900 ^{0}C, C_{O_2} =0,064 кг/м^3, C_{CH_4} = 0,032 кг/м^3.

Для расчета массопереноса концентраций образующихся при горении твердых коммунальных отходов дымовых газов, в числе которых будем оценивать CO_2, SO_2, запишем следующее уравнение (формула 8):

$$\frac{dC}{dt}+u_z\frac{dC}{dz}=k_z\frac{d^2C}{dz^2}+Y(z,t), \qquad (8)$$

где C – концентрация дымового газа, кг/м^3; u_z – скорость продвижения огневого потока, м/с по вертикали; k_z – коэффициент вертикальной диффузии М. И. Будыко, м^2/с; $Y(z,t)$ – параметр очага горения, характеризует генерацию или поглощение вещества, кг/м^3·с, рассчитывается по формуле $\frac{dC}{dt}+u_z\frac{dC}{dz}=k_z\frac{d^2C}{dz^2}+Y(z,t)$, здесь $k_{гор}$ – коэффициент скорости выгорания отходов, 1/с; $f(T,u_z)$ – функция, связывающая температуру, K, и скорость вертикального огневого потока, м/с; X_i^p – содержание серы (*S до 0,1 %*) или углерода (*C до 27,9 %*) в твердых коммунальных отходах, %; η_i – доля оксидов серы или углерода, улавливаемых летучей золой (примем долю оксидов серы, улавливаемых летучей золой по эмпирическим данным, равной 0,3; а долю оксидов углерода – 0,1).

Расчет массопереноса водяного пара H_2O, образующегося при горении поверхностного слоя твердых коммунальных отходов, осуществим по формуле (9):

$$\frac{dC_{H_2O}}{dt}+u_z\frac{dC_{H_2O}}{dz}=k_z\frac{d^2C_{H_2O}}{dz^2}+Y_{H_2O}(z,t), \qquad (9)$$

где $C_{H_2O}(z,t)$ – концентрация водяного пара на высоте z и в момент времени t, кг/м^3; u_z – скорость продвижения огневого потока, м/с по вертикали; k_z – коэффициент вертикальной диффузии М. И. Будыко, м^2/с; $Y_{H_2O}(z,t)$ – параметр очага горения, характеризует генерацию или поглощение вещества, кг/м^3·с, рассчитывается по формуле $Y_{H_2O}(z,t)=\alpha\cdot k_{гор}$ здесь α – стехиометрический коэффициент (при влажности твердых коммунальных отходов f=10 % принимает значение 0,7 кг/м^3; при влажности f = 60 % α = 1,3 кг/м^3 соответственно); $k_{гор}$ – константа скорости реакции выделения водяного пара, при горении поверхностного слоя твердых коммунальных отходов при T = 600 – 1200 $^\circ$C и влажности f = 10-60 % значительная часть тепла расходуется на испарение воды, что снижает температуру в очаге горения и, как следствие, константу скорости реакции, которая в данном случае составляет от 10^{-3} до 10^{-1} 1/с.

Наконец, запишем уравнение, описывающее массоперенос несгоревших частиц (формула 10):

$$\frac{dC}{dt}+u_z\frac{dC}{dz}=k_z\frac{d^2C}{dz^2}+Y(z,t), \qquad (10)$$

где C – концентрация несгоревших частиц, кг/м^3; u_z – скорость продвижения огневого потока, м/с по вертикали; k_z – коэффициент вертикальной диффузии М. И. Будыко, м^2/с; $Y(z,t)$ – параметр очага горения, характеризует генерацию или поглощение вещества, кг/м^3·с, рассчитывается по формуле (11):

$$Y(z,t)=G_{обр}(z,t)-G_{ун}(z,t), \qquad (11)$$

где $G_{обр}$ – скорость образования несгоревших частиц в координате z и времени t, кг/м^3·с, определяется по формуле $G_{обр}(z,t)=k_{гор}\cdot e_ч$, здесь $k_{гор}$ – константа скорости выгорания твердых коммунальных отходов, $k_{гор}$ ~ 0,005 – 0,02 с$^{-1}$); $e_ч$ – удельный выход несгоревших частиц (золы, сажи) на 1 кг сгоревших твердых коммунальных отходов, кг/кг (примем для золы $e_ч$ = 0,00125 кг/м^3; а для сажи $e_ч$ = 0,000625 кг/м^3); $G_{ун}$ – скорость уноса или осаждения несгоревших частиц в координате z и времени t, кг/м^3·с, определяется по формуле $G_{ун}(z,t)=u_z\cdot C(z,t)$, $C(z,t)$ – концентрация несгоревших частиц, кг/м^3; u_z – скорость продвижения огневого потока, м/с по вертикали.

Отрицательные значения $Y(z,t)$ из формулы (11) означают преобладание уноса несгоревших частиц, описываемых $G_{ун}$, кг/м^3·с, над образованием, $G_{обр}$, кг/м^3·с, что обеспечивает преобразование поверхностного возгорания в опасный объемный пожар.

Результаты расчетов по формулам модели тепломассопереноса (1-11) приведены в таблице.

Таблица

Некоторые параметры модели тепломассопереноса, вычисленные при ее реализации
[*Table.* Some parameters of the heat and mass transfer model calculated during its implementation]

Модельное уравнение / The model equation	Наименование параметра / Name of the parameter	Вычисленное значение параметра / Calculated parameter value
u_r, м/с	скорость продвижения огневого потока в горизонтальной плоскости по координате r	0,17-0,25
u_z, м/с	скорость продвижения огневого потока в вертикальной плоскости по координате z	0,02-0,07
Q, кДж/м^2	мощность источника тепла, характеризующая теплоперенос по вертикали	7200-8300
$G_{обр}$, кг/м^3 с	скорость образования несгоревших частиц в координате z и времени t	0,000009375-0,0000375
$G_{ун}$, кг/м^3.с	скорость уноса или осаждения несгоревших частиц в координате z и времени t	0,06-0,028

Примечание: результаты расчета уравнений массопереноса (6-11) приведены в объемных расходах веществ.
[Note: The results of calculating the mass transfer equations (6-11) are given in terms of volumetric flow rates.]

Фактически возможность преобразования поверхностного пожара в объемный обеспечивается скоростью уноса или осаждения несгоревших частиц, зависящих от вертикальной скорости продвижения огневого потока и концентрации несгоревших частиц.

Учет рассчитанных параметров объемных пожаров на основе примененной модели тепломассопереноса при разработке мониторинговых мероприятий, зонировании полигонов, размещении гидрометеорологических датчиков и газоанализаторов позволит избежать социально-экономических рисков гибели персонала и техники, а также снизить величину экологического риска для здоровья населения более чем в 10 раз, приведя его уровень до приемлемого.

Реализация многокомпонентной модели тепломассопереноса для математического описания развития пожаров на поверхности твердых коммунальных отходов позволила уточнить их параметры, установив условия их преобразования в объемные. Полученные параметры могут быть использованы для разработки научно-технических мероприятий по предупреждению и ликвидации очагов горения, в числе которых наиболее предпочтительными являются послойное складирование отходов с обязательным их уплотнением для предотвращения образования полостей с концентрацией биогаза; внедрение системы дегазации с установкой вертикальных газовых скважин для отведения биогаза с последующей его утилизацией. Применение вычисленных в исследовании параметров, способствующих активному преобразованию горизонтальных очагов возгораний в вертикальные, объемные, пожары, предполагает зонирование полигонов с размещением на их территории системы датчиков температуры и влажности воздуха, а также приповерхностной скорости ветра, включая блок газоанализаторов, реагирующих на концентрацию биогаза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение многокомпонентной модели тепломассопереноса для повышения экологической безопасности полигонов ТКО основано на возможности имитационного расчета параметров возгораний и стремительно развивающихся объемных пожаров, ввиду невозможности осуществления полевых или экспериментальных исследований. Уравнения модели позволяют учесть гидрометеорологические условия как наиболее важные, являющиеся основным начальным условием возникновения объемных пожаров. Результаты модельных расчетов параметров, критические значения которых приводят к развитию объемных пожаров позволят обеспечить экологическую безопасность полигонов ТКО за счет системного применения природоохранных мер, направленных на послойное складирование отходов с обязательным их уплотнением для исключения образования полостей с концентрацией биогаза, внедрение системы вертикальных скважин газоотведения с последующей его утилизацией.

Подобные мероприятия в своей совокупности, как представляется, не только обеспечат проведение мониторинга очагов горения, но и создадут основу для управления пожарной и экологической безопасностью полигонов твердых коммунальных отходов, снизив экологические риски для населения урбанизированных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева Е. С., Масленский В. В., Денисов О. В. Подходы к управлению рисками возгораний на полигонах твердых коммунальных отходов //*Экология и промышленность России*, 2025, т. 29, № 10, с. 16-22.

2. Гаврилов А. С., Мханна А. И., Харченко Е. В. Верификация модели атмосферного пограничного слоя применительно к задачам прогноза загрязнения атмосферы от очагов лесных пожаров // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*, 2013, № 32, с. 119- 129.

3. Колибаба О. Б., Габитов Р. Н., Муратова Т. В. Математическое моделирование тепломассопереноса в слое твердых бытовых отходов в процессе его сушки // *Вестник Ивановского государственного университета*, 2016, № 6, с. 43-48.

4. Огурцов Д. А. Матрица факторов пожарной опасности воздушных линий электропередачи как основа для моделирования риска // *Безопасность техногенных и природных систем*, 2026, т. 950, № 1, с. 7-18.

5. Особенности методов вычислительной гидродинамики для моделирования турбулентности / И. Я. Львович, Я. Е. Львович, А. П. Преображенский, О. Н. Чопоров // *Информационные технологии*, 2016, т. 22, № 12, с. 905-913.

6. Численное моделирование пограничного слоя атмосферы с учетом ее стратификации / А. И. Купцов, Р. Р. Акберов, Д. Я. Исламхузин, Ф. М. Гимранов // *Фундаментальные исследования*, 2014, № 9-7, с. 1452-1460.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 12.01.2026
Принята к публикации: 20.05.2026

UDC 504.064.2.001.18 *ISSN 1609-0683*
DOI: https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/2/127-133

Ensuring Environmental Safety of Solid Municipal Waste Landfills Based on Calculations of Volumetric Fire Parameters Using a Heat and Mass Transfer Model

E. S. Andreeva✉

Don State Technical University, Russian Federation
(1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344000)

Abstract. *The purpose* is to ensure the environmental safety of municipal solid waste landfills by adapting heat and mass transfer equations for mathematical modeling of the parameters of dangerous volumetric fires, whose rapid development causes high levels of air pollution and increases environmental risks.

Materials and Methods. A multicomponent heat and mass transfer model was used to mathematically describe the combustion processes in waste layers and the subsequent development of combustion in the surface air layer. This model takes into account the thermal transformation of matter, the humidity and temperature of the environment, and the horizontal and vertical air transport velocities. A refined formula by R. Rothermel was used to account for the contribution of vertical thermal diffuse convection. The mathematical problem was solved using the Monin-Obukhov hypothesis in a cylindrical coordinate system.

Results and Discussion. The physical processes that facilitate and accompany ignition in the waste layer are described, as well as the parameters characterizing combustion centers in the surface waste layer and the vertical development of the fire process during thermal turbulent convection within the fire source. The initial and boundary conditions of volumetric fires are established based on the principles of heat and mass transfer.

Conclusions. To prevent the development of large-scale fires in the waste layer, it is envisaged to develop a series of measures aimed at layer-by-layer storage of waste with mandatory compaction to prevent the formation of cavities with a concentration of biogas, the introduction of a system of vertical gas removal wells with its subsequent disposal, which will ensure increased environmental and fire safety of landfills, taking into account the parameters obtained in the work and the relationships between them.

***Key words*:** municipal solid waste, heat and mass transfer model, thermal convection, environmental safety of municipal solid waste landfills, recommendations for preventing the development of large-scale fires in municipal solid waste layers.

For citation: Andreeva E. S. Ensuring Environmental Safety of Solid Municipal Waste Landfills Based on Calculations of Volumetric Fire Parameters Using a Heat and Mass Transfer Model. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2026, no. 2, pp. 127-133 (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/2/127-133

REFERENCES

1. Andreyeva E. S., Maslenskiy V. V. Denisov O. V. Podhody k upravleniyu riskami vozgoranij na poligonah tverdyh kommunal'nyh othodov [Approaches to managing fire risks at municipal solid waste landfills]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2025, vol. 29, no. 10, pp. 16-22. (In Russ).

2. Gavrilov A. S., Mhanna A. I., Harchenko E. V. Verifikaciya modeli atmosfernogo pogranichnogo sloya primenitel'no k zadacham prognoza zagryazneniya atmosfery ot ochagov lesnyh pozharov [Verification of the atmospheric boundary layer model in relation to the tasks of predicting atmospheric pollution from forest fires]. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta,* 2013, no. 32, pp. 119-129. (In Russ).

3. Kolibaba O. B., Gabitov R. N., Muratova T. V. Matematicheskoe modelirovanie teplomassoperenosa v sloe tverdyh bytovyh othodov v processe ego sushki [Mathematical modeling of heat and mass transfer in a layer of solid household waste during its drying]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta,* 2016, no. 6, pp. 43-48. (In Russ).

4. Ogurcov D. A. Matrica faktorov pozharnoj opasnosti vozdushnyh linij elektroperedachi kak osnova dlya modelirovaniya riska [Matrix of fire hazard factors of overhead power lines as a basis for risk modeling]. *Bezopasnost' tekhnogennyh i prirodnyh sistem*, 2026, t. 950, no. 1, pp. 7-18. (In Russ).

5. Osobennosti metodov vychislitel'noj gidrodinamiki dlya modelirovaniya turbulentnosti [Features of computational fluid dynamics methods for turbulence modeling] / I. Ya. Lvovich, Ya. E. Lvovich, A. P. Preobrazhenskiy, O. N. Choporov. *Informatsionnyye tekhnologii*, 2016, vol. 22, no. 12, pp. 905-913. (In Russ).

6. Chislennoe modelirovanie pogranichnogo sloya atmosfery s uchetom ee stratifikacii [Numerical modeling of the atmospheric boundary layer, taking into account its stratification] / A. I. Kupcov, R. R. Akberov, D. Ya. Islamhuzin, F.M. Gimranov. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014, no. 9-7, pp. 1452-1460. (In Russ).

Conflict of interests: The author declares no information of obvious and po-tential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 12.01.2026
Accepted: 20.05.2026

© Andreeva E. S., 2026
✉ Elena S. Andreeva, e-mail: meteo0717@yandex.ru
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Андреева Елена Сергеевна
Доктор географических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-7087-1870, e-mail: meteo0717@yandex.ru

Elena S. Andreeva
Dr. Sci. (Geogr.), Prof. at the Department of Life Safety and Environmental Protection, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-7087-1870, e-mail: meteo0717@yandex.ru