

Рашкевич Н.В., аспирант

Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков, Украина

Гончаренко И. О., соискатель УкрНИИЭП

Государственная экологическая инспекция, г. Харьков, Украина

Анищенко Л. Я., д-р. техн. наук, доц.

Научно-исследовательское учреждение «Украинский научно-исследовательский

институт экологических проблем», г. Харьков, Украина

Писня Л. А., канд. техн. наук

Научно-исследовательское учреждение «Украинский научно-исследовательский

институт экологических проблем», г. Харьков, Украина

Петрухин С. Ю., канд. техн. наук

Военный институт танковых войск НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина

Серикова Е. Н., инженер

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного, г. Харьков, Украина

РАСПРОСТРАНЕНИЕ БИОГАЗА НАД ПОЛИГОНОМ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Полигоны твердых бытовых отходов (ТБО) размещаются в окрестностях населенных пунктов. Продукты разложения ТБО несут опасность не только для окружающей природной среды, но и для здоровья населения [1-3].

Происходит химическое загрязнение атмосферного воздуха над территорией полигонов ТБО за счет выделения биогаза. В состав биогаза входят легковоспламеняющиеся, токсичные вещества, которые создают угрозу возникновения пожаров, взрывов [4]. Биогаз поднимается вверх, переносится ветром на достаточно большие расстояния, в том числе и в сторону населенных пунктов. Это может привести к массовому отравлению людей [4].

Данные о возникновении пожаров и других чрезвычайных ситуациях в местах удаления отходов [5,6] свидетельствуют о несовершенстве современных мероприятий по предупреждению и минимизации влияния *источников техногенной и экологической опасности на окружающую природную среду и здоровье населения*.

Существующие модели расчета эмиссии биогаза основаны преимущественно на решении уравнения Моно, распада первого порядка, такого как в TNO, LandGEM, Gassim, Afvalzorg, EPER, IPCC, LFGREEN. Эти модели учитывают содержание углерода, влаги, возраст отходов, их способность разлагаться, метеорологические условия. В частности следует обратить внимание, что метеорологические условия существенно влияют на состав и поток регенерации свалочного газа. В зависимости от исходных данных, практический интерес представляют методики Табасарана-Реттенбергера, Вебера Б., LandGEM, А. М. Шаимовой [7,8].

Модели оценки распространения компонентов биогаза в атмосферном воздухе в большинстве случаев построены на функции распределения Гаусса, методике ОНД-86, уравнении турбулентной диффузии.

Исследование температуры в теле полигона на основе численного моделирования [9] показывает температуру в пределах 20–50 °С. Это подтверждает способность биогаза к плавучести, когда его температура выше температуры атмосферного воздуха.

Оценка максимальной высоты и скорости подъема нагретых газообразований (биогаза), их размера, плавучести, избыточной температуры как функции высоты и времени подъема, особенно в условиях чрезвычайных ситуаций, является необходимой для обеспечения экологической безопасности полигонов ТБО.

Цель данной работы заключается в исследовании эволюции нагретого газообразования (биогаза) при конвективном подъеме в атмосферном воздухе над полигоном ТБО.

Будем считать, что всплывающее нагретое газообразование имеет форму сферы с постепенно увеличивающимся радиусом. При этом скорость вовлечения холодного воздуха пропорциональна как площади всплывающего образования, так и скорости подъема его центра масс. Коэффициент пропорциональности считается постоянным. Так как радиус образования намного меньше высоты однородной атмосферы и толщины тропосферы, то стратификацией атмосферы можно пренебречь.

Исходные данные определяем из уравнений скорости движения центра нагретого объема V воздуха массой m , радиусом R , плотностью ρ и абсолютной температурой T , скорости увеличения массы вовлекаемого холодного воздуха v с плотностью ρ_0 , температурой T_0 и полного интеграла плавучести (1) — (4).

$$\frac{4\pi}{3}F = \frac{4\pi}{3}g\vartheta R^3, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, $\vartheta = (\rho_0 - \rho)/\rho_0$ — плавучесть.

Плавучесть биогаза обусловлена тем, что его плотность меньше, чем воздуха $\rho < \rho_0$, то есть этот газ является более легким. Используемая далее модель пригодна в случае, если поднимаются объемы нагретого образования. В результате биохимических процессов разложения отходов выделяется с продуктами разложения тепло, которое обуславливает разницу температур. При этом плавучесть вызвана $T > T_0$, в этом случае $\vartheta = (T_0 - T)/T_0$. В условиях полигона ТБО одновременно имеют место оба случая.

Исходные уравнения с учетом сопротивления воздуха включают в себя соотношения скорости подъема, массы вовлекаемого холодного воздуха и полного интеграла плавучести нагретого образования:

$$m \frac{dv}{dt} = F_A - mg - \rho_0 v^2 S / 2, \quad (2)$$

$$\frac{dm}{dt} = \alpha S_1 v \rho_0, \quad (3)$$

$$\frac{dF}{dt} = -N^2 \nu R^3, \quad (4)$$

где t — время, $F_A = \rho_0 V g$ — сила Архимеда, mg — сила тяжести, $\rho_0 \nu^2 S/2$ — сила сопротивления воздуха.

Для сферического газообразования $S = \pi R^2$ — площадь поперечного сечения, $S_1 = 4\pi R^2$ — площадь поверхности сферы, α — коэффициент захвата холодного воздуха, $N \approx 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ — коэффициент Брента-Вайсяля [10], $C = C_D + 8\alpha$ — эффективный коэффициент сопротивления, C_D — коэффициент сопротивления (для сферы при умеренных скоростях $C_D \approx 0,5$, а $\alpha \approx 0,1$ и $C \approx 1,3$ [10]). Поскольку, $m = \rho V = 4\pi R^3 \rho / 3$, $\rho = \rho_0 T_0 / T$, то уравнения (2) — (4) с учетом (1) примут вид:

$$\frac{d\nu}{dt} = \nu g - \beta(1 + \vartheta) \frac{\nu^2}{R}, \quad \beta = 3C / 8 \approx 0,5,$$

$$\frac{dR}{dt} - \frac{R}{3(1 + \vartheta)} \frac{d\vartheta}{dt} = \alpha \nu(1 + \vartheta), \quad (5)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} + 3\vartheta \left(\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \right) = -\frac{N^2 \nu}{g}. \quad (6)$$

Окончательное решение имеет вид:

$$\vartheta(R) = \vartheta_0 (R_0/R)^3 \text{ или } \vartheta R^3 = \vartheta_0 R_0^3. \quad (7)$$

Соотношение (7) отображает факт сохранения полного интеграла плавуемости, то есть $dF/dt = 0$, а $F = F_0$.

Таблица 1 — Значения основных параметров нагретого газообразования ($R_0 = 10 \text{ м}$)

Параметр	ϑ_0				
	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
$Z_1, \text{ м}$	900	900	900	900	900
$Z_{\text{max}}, \text{ м}$	1000	1000	1000	1000	1000
$\nu_{ch}, \text{ м/с}$	0,50	0,86	1,57	2,71	5,00
$\nu_{\text{max}}, \text{ м/с}$	0,36	0,63	1,14	1,98	3,61
$t_{0v}, \text{ с}$	111	64,6	35,4	20,5	11,1
$t_{\nu}, \text{ с}$	55,6	31,75	17,54	10,10	5,54
$t_{\vartheta}, \text{ с}$	94,3	52,9	29,2	16,8	9,2
$t_{Rv}, \text{ с}$	383	158,75	87,7	50,50	27,7
$t_{\text{max}}, \text{ с}$	$1,1 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$

Таблица 2 — Значения основных параметров нагретого газообразования ($R_0 = 100$ м)

Параметр	ϑ_0				
	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
Z_1 , км	9	9	9	9	9
Z_{\max} , км	10	10	10	10	10
v_{ch} , м/с	1,50	2,71	5,00	8,57	15,00
v_{\max} , м/с	1,10	1,98	3,61	6,26	11,00
t_{0r} , с	370,3	205	111,1	64,8	37,0
t_{1r} , с	181,8	101,0	55,4	31,9	18,2
t_{2r} , с	302,2	168,3	92	53,2	30,2
t_{Rr} , с	906,5	505	277	159,5	90,7
t_{\max} , с	$3,7 \cdot 10^4$	$2,05 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^3$

Таблица 3 — Значения основных параметров нагретого газообразования ($R_0 = 1000$ м)

Параметр	ϑ_0				
	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
Z_1 , км	90	90	90	90	90
Z_{\max} , км	100	100	100	100	100
v_{ch} , м/с	5,00	8,57	15,00	27,11	50,00
v_{\max} , м/с	3,61	6,26	11,00	19,80	36,1
t_{0r} , с	1111	648,2	370,3	204,9	111,1
t_{1r} , с	554	319,5	181,8	101	55,4
t_{2r} , с	923	532,5	303	168,3	92,3
t_{Rr} , с	2770	1597,5	909	505	277
t_{\max} , с	$1,1 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$

Приведем результаты расчетов основных параметров, описывающих конвективный подъем нагретых образований в атмосфере (биогазов), для значений ϑ_{0r} равных 10^{-3} , $3 \cdot 10^{-3}$, 10^{-2} , $3 \cdot 10^{-2}$, 10^{-1} , а также для R_{0r} равных 10, 100 и 1000 м (табл. 1, 2 и 3). Максимальное значение R_0 определяется не размером источника чрезвычайной ситуации, который может составлять ~ 1–10 км, а значением внешнего масштаба турбулентности L_t в атмосфере.

Из таблиц 1, 2 и 3 видно, что при увеличении ϑ_0 пространственные и временные масштабы изменения скорости, радиуса и относительного нагрева образования (плавучесть) уменьшаются. Значения скоростей v_{\max} и $v(L_v)$, а также высоты и времени подъема нагретых образований, напротив, увеличиваются при увеличении ϑ_0 .

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель, которая описывает высотную и временную зависимости основных параметров нагретых газообразований над территорией полигона ТБО при их конвективном подъеме в атмосферном воздухе.

Проведены числовые расчеты для различной плавучести биогаза ($\vartheta_0 \approx 10^{-3} - 10^{-1}$) и разных размеров источника опасности (радиусом R_0 10, 100 и 1000 м). Установлено, что с увеличением радиуса источника пропорционально растет и максимальная высота подъема биогаза, достигая 1–10 км. Максимальная скорость подъема биогаза меняется от 0,36–3,6 м/с при $\vartheta_0 = 10^{-3}$ до 3,6–36,1 м/с при $\vartheta_0 = 10^{-1}$. Время подъема биогаза уменьшается от 3–24 часов при $\vartheta_0 = 10^{-3}$ до 0,3–3 часа при $\vartheta_0 = 10^{-1}$.

Показано, что в процессе подъема биогаза радиус нагретого объема увеличивается за счет присоединения холодного воздуха, избыток температуры в нем и плавучесть уменьшается, а скорость подъема сначала увеличивается, а затем постепенно уменьшается.

Результаты исследования имеют практическое значение при оценке состояния атмосферного воздуха в зоне воздействия полигонов ТБО, для эффективного размещения и использования средств наблюдения и контроля показателей факторов опасностей (концентраций, температур), принятия управленческих решений по ведению аварийно-спасательных работ, а также для прогноза последствий воздействия чрезвычайных ситуаций на окружающую среду и население.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Архіпова Г. І. Вплив звалищ побутових відходів на здоров'я людей / Г. І. Архіпова, Ю. О. Галушка // Вісник НАУ. — 2009. — №3. — С. 217–219.
2. Дмитрук, О. О. Фізико-хімічна сутність процесу утворення звалищного газу з твердих побутових відходів / О. О. Дмитрук, Е. А. Дмитрук // Збірник наукових праць НГУ. — 2017. — № 52. — С. 335–341.
3. Бичелдей, Т. К. Моделирование переноса и рассеивания компонентов биогаза в атмосферном воздухе с территории захоронения твердых бытовых отходов / Т. К. Бичелдей / Вестник РУДН. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». — 2011. — № 1. — С. 49–52.
4. Попович, В. В. Пожежна небезпека стихійних сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів / В. В. Попович // Пожежна безпека: зб. наук. праць. — 2012. — № 21. — С. 140–147.
5. Аналіз масиву карток обліку пожеж [Електронний ресурс] // Український науково-дослідний інститут цивільного захисту. — Режим доступу: <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Analiz-masivu-kartok-obliku-pozhezeh.html>.

6. World Fire Statistics [Electronic resource] // International Association of Fire and Rescue Service. — Available: <http://www.ctif.org/ctif/world-fire-statistics>.
7. Шаимова А.М. Разработка математической модели образования биогаза на полигонах твердых бытовых отходов / А. М. Шаимова, Л. А. Насырова, Г. Г. Ягафарова, Е. Г. Ильина, Р. Р. Фасхутдинов // Нефтегазовое дело. — 2009. — Том 7. — № 1. — С. 137–140.
8. Kamalan H. A. (2011). Review on Available Landfill Gas Models / H. Kamalan, M. Sabour, N. Shariatmadari // Journal of Environmental Science and Technology. — № 4. — P. 79–92.
9. Осіпова, Т. А. Прогнозування виходу біогазу і температури полігону твердих побутових відходів на основі математичного моделювання / Т. А. Осіпова, Н. С. Ремез // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. — Вип. 3/2015 (92). — С. 144–149.
10. Гостинцев, Ю. А. О механизме генерации длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающим облаком продуктов взрыва. / Ю. А. Гостинцев, Ю. В. Шацких // Физика горения и взрыва. — 1987. — №2. — С. 91–97.
11. Figueroa V. K. (2010). Estimating Landfill Greenhouse Gas Emissions from Measured Ambient Methane Concentrations and Dispersion Modeling / V. K. Figueroa, C. D. Cooper, K. R. Mackie. — Tallahassee: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Central Florida. — 17 p.