

УДК 628.854.001.572

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕИВАНИЯ БИОГАЗА С ПОЛИГОНОВ ТБО И ПО НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДИФФУЗИИ И НАВЬЕ-СТОКСА

Сауц А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красногвардейская, 4), e-mail: [artursauc@narod.ru](mailto:artursauc@narod.ru)

В работе рассматриваются процессы численного моделирования рассеивания биогаза с полигонов твёрдых бытовых и промышленных отходов (ТБО и ПО), с учётом влияния их расположения, геометрических характеристик, а также прилегающей застройки. Моделирование основано на решении системы уравнений Навье-Стокса для несжимаемой среды, уравнения турбулентной диффузии. Появление дополнительной турбулентной вязкости, вызванной образованием вихрей при обтекании полигонов ТБО и ПО, зданий и сооружений, учитывается с помощью модели Смагоринского. Произведено сравнение результатов расчётов по предложенной модели с результатами расчётной методики ОНД-86 и замерами концентраций компонентов биогаза на полигоне ТБО и ПО «Центральный» Волгоградской области. Полученные результаты можно использовать для оценки загрязнённости атмосферного воздуха в зоне расположения полигонов ТБО и ПО; при выборе места расположения будущих полигонов ТБО и ПО; при обосновании размеров санитарно-защитных зон полигонов ТБО и ПО; при рекультивации и оценке эффективности мер по снижению загрязнения атмосферного воздуха биогазом (utiлизация биогаза, выбор оптимального расположения и характеристик газодренажных скважин и т.д.).

Ключевые слова: численное моделирование, биогаз, полигоны ТБО и ПО, свалки, уравнения Навье-Стокса, уравнение турбулентной диффузии, модель Смагоринского, турбулентная вязкость.

## NUMERICAL MODELING OF THE DISPERSION OF BIOGAS FROM LANDFILLS ON THE BASIS OF THE SOLUTION OF DIFFUSION AND NAVIER-STOKES EQUATIONS

Sauts A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education "Saint-Petersburg State University of Architecture and Construction", Saint-Petersburg, Russia (190005, Saint- Petersburg, 2<sup>nd</sup> Krasnoarmeyskaya Street, 4), e-mail: [artursauc@narod.ru](mailto:artursauc@narod.ru)

The work deals with the processes of numerical modeling of dispersion of biogas from landfills, with account of the influence of their location, geometric characteristics, as well as the adjacent building. Simulation is based on solving a system of Navier-Stokes equations for incompressible medium, the equation of turbulent diffusion. The additional turbulent viscosity, caused by the formation of vortices in the flow of the landfills, buildings and works is accounted for using the model Smagorinsky. A comparison of the results of calculations by the proposed model with the results of the assessment procedure OND-86 and measured concentrations of the components of biogas at landfill and on "Centralny" Volgograd region. The results can be used for the assessment of the pollution of the atmospheric air in the area of location of landfills; in the choice of locations for future landfills; the justification of the size of the sanitary protection zones of landfills; for reclamation and evaluation of the effectiveness of measures on reduction of atmospheric air pollution biogas (utilization of biogas, selection of the optimal location and characteristics gas drainage wells, etc.).

Key words: numerical modeling, biogas, landfills, dumps, Navier-Stokes equations, the equation of turbulent diffusion, Smagorinsky model, the turbulent viscosity.

### Введение

При разложении ТБО и ПО на полигонах образуется биогаз – газовая смесь углеводородов, углекислого газа, сероводорода, ксиола, аммиака и др. Некоторые его компоненты токсичны и взрывопожароопасны. Экологическая опасность рассеивания биогаза вызвана загрязнением прилегающей к полигону территории. Известные методики расчёта поля концентраций примеси, как ОНД-86, нормальное (Гауссово) распределение

являются в большей части аппроксимациями и не рассматривают детально процессы, происходящие при обтекании потоком препятствий, коими являются здания, сооружения и сами полигоны, которые имеют внушительные размеры и способны существенно влиять на конвективные и турбулентные процессы переноса примеси.

**Цель статьи** – численное моделирование рассеивания биогаза с полигонов ТБО и ПО с помощью решения уравнений диффузии и Навье-Стокса. Полученные результаты можно использовать:

- для оценки загрязнённости атмосферного воздуха в зоне влияния полигонов ТБО и ПО;
- при выборе места расположения будущих полигонов ТБО и ПО;
- при обосновании размеров санитарно-защитных зон полигонов ТБО и ПО;
- при рекультивации и оценке эффективности мер по снижению загрязнения атмосферного воздуха биогазом (утилизация биогаза, выбор оптимального расположения и характеристик газодренажных скважин и т.д.).

Для моделирования рассеивания биогаза предложено численное решение дифференциального уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси в атмосферном воздухе, которое имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial u c}{\partial x} + \frac{\partial v c}{\partial y} + \frac{\partial w c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial c}{\partial z} + I(\vec{r}, t); \quad (1)$$

где  $u, v, w$  – компоненты скоростей ветра вдоль осей  $x, y, z$  соответственно;  $k_x, k_y, k_z$  – коэффициенты турбулентности вдоль осей  $x, y, z$  соответственно;  $I(\vec{r}, t)$  – функция эмиссии примесей. Для упрощения расчётов в дальнейшем в уравнении (1) принято  $I(\vec{r}, t) = 0$ , а учёт эмиссии биогаза производится с помощью граничных условий – концентрации на поверхности полигона [4].

Коэффициенты турбулентности целесообразно определять с помощью модели Дж. Смагоринского, учитывающей появление дополнительной турбулентности, вызванной завихрённостью, с помощью уравнений [3]:

$$\begin{cases} k_i = k_j = \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta^2} k_{\text{баз}} \\ k_k = \left( \frac{\Delta z}{\Delta} \right)^2 k_{\text{баз}} \end{cases}. \quad (2)$$

где  $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$  – масштаб для мелких вихрей определяется шириной трёхмерной ячейки,  $k_{\text{баз}}$  – базовый коэффициент турбулентности, определяющийся как:

$$k_{\text{баз}} = \begin{cases} k_\phi + \frac{\epsilon \Delta^2}{\sqrt{2}} |Def| \sqrt{1-Ri}, & Ri < 1 \\ k_\phi, & Ri \geq 1 \end{cases}; \quad (3)$$

где  $k_\phi$  – фоновый коэффициент турбулентности,  $k_\phi = 1-15 \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\varepsilon = 0,1-0,4$ ;  $Def(x; y; z; t)$  – функция диссипации или деформации, определяемая как

$$Def(x; y; z; t) = \left( \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \right)^{1/2}; \quad (4)$$

$Ri$  – локальное число Ричардсона, определяющееся с помощью уравнения:

$$Ri(x; y; z; t) = g \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{T(x, y, z, t)}{T_\phi(z)} + \gamma_\phi(z) - \gamma_a \right) / [Def(x; y; z; t)]^2; \quad (5)$$

где  $T$  – температура;  $\gamma_\phi(z)$  – градиент фоновой температуры,  $\gamma_a$  – адиабатический градиент температуры.

Тепловизионная съёмка различных полигонов ТБО и ПО, проводившаяся нами в работе [5], показала, что выброс биогаза на полигоне можно считать «холодным», т.е.:

$$T_{\text{биогаза}} \approx T_\phi; \quad (6)$$

где  $T_{\text{биогаза}}$  и  $T_\phi$  – температуры выбрасываемого биогаза и фоновая.

При моделировании рассеивания выбросов от низких источников наибольший интерес представляет нижняя граница приземного слоя атмосферы, к которой относят нижние 50-100 м. В ней вертикальные потоки тепла и импульса остаются постоянными по высоте и проявляется устойчивое состояние атмосферы. Учитывая небольшую вертикальную протяжённость этого слоя, можно принять условие равновесной (безразличной) стратификации, когда вертикальный поток тепла равен нулю, а изменение температуры происходит по адиабатическому закону [1]. При этом вертикальный градиент температуры равен адиабатическому  $\gamma_a = 0,01^\circ\text{C}/\text{м}$ .

При безразличной стратификации атмосферы для «холодных» выбросов  $Ri(x, y, z, t) \approx 9,81 \frac{\partial}{\partial z} (1 + 0,01 - 0) / [Def(x, y, z, t)]^2 \approx 0$  система (3) примет более простой вид:

$$k_{\text{баз}} = k_\phi + \frac{\varepsilon \Delta^2}{\sqrt{2}} Def. \quad (7)$$

Шероховатая, химически активная поверхность способна к частичному удерживанию биогаза на поверхности с дальнейшим поглощением. При аэробных процессах в составе биогаза преобладает углекислый газ, поглощаемый при фотосинтезе. Остальные его компоненты отправляют почву и растения. Диффузию газа на границе «воздух-почва» можно выразить уравнением:

$$k_z \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z \rightarrow 0} = \beta c; \quad (8)$$

где  $\beta$  – константа взаимодействия (для гладкой, химически инертной поверхности  $\beta \approx 0$ ).

В начальный момент времени (без учёта фона) значения концентрации примесей биогаза равны нулю. На бесконечно большом расстоянии от полигона значения концентраций примесей также равны нулю. Это можно выразить в виде условий:

$$c \Big|_{t=0} = c \Big|_{|x| \rightarrow \infty} = c \Big|_{|y| \rightarrow \infty} = c \Big|_{|z| \rightarrow \infty} = 0. \quad (9)$$

Для решения задачи турбулентного движения газа используется прямое моделирование «DNS», основанное на решении нестационарных уравнений Навье-Стокса (для несжимаемой среды):

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = v \Delta \vec{V} - \frac{\nabla p}{\rho_\phi}; \\ \nabla \cdot \vec{V} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

где  $v$  – кинематическая вязкость,  $p$  – давление,  $\vec{V} = \vec{V}\{u; v; w\}$  – вектор скорости.

Для набегающего потока (входящего в расчётную область) давление  $p$  принимается равным атмосферному,  $v = w = 0$ , профиль скоростей ветра при нейтральной стратификации атмосферы описывается уравнением Кармана [3]:

$$u = u^* \ln[(z - H_{cp} + z_0/C)/z_0]/\zeta; \quad (11)$$

где  $u^*$  – динамическая скорость, м/с;  $z_0$  – параметр шероховатости поверхности;  $\zeta$  – коэффициент Кармана  $\zeta = 0,4$ ;  $H_{cp}$  – средняя высота ветровых препятствий (застройки, лесополосы);  $C$  – коэффициент сопротивления. Значения  $z_0$  и  $C$  для некоторых поверхностей приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения коэффициентов  $z_0$  и  $C$  для некоторых типов поверхностей [3]

Тип поверхности	$z_0$ , см	$C \cdot 10^3$
Песок	0,01-0,1	1,2-1,9
Степь	1-4	3,4-5,2
Высокая трава	4-10	5,2-7,6
Пригородная застройка	20-40	10,5-15,4
Центры городов	200-300	61,8-110,4

Профиль скоростей ветра удобно также задавать уравнением, использующимся при моделировании в аэродинамических трубах [3]:

$$u = u_0 (z/z_0)^B; \quad (12)$$

где  $z_0$  – заданная высота (например, высота флюгера);  $u_0$  – скорость ветра на заданной высоте  $z_0$ ;  $B$  – коэффициент аппроксимации,  $B = 1/7$ .

Для решения задач, связанных с переносом турбулентным потоком скалярных субстанций, при решении дифференциальных уравнений используют схему расщепления по физическим процессам. Согласно принципам расщепления конечно-разностное интегрирование уравнений гидродинамики и конвективно-диффузного переноса скалярной

субстанции на каждом шаге по времени  $\Delta t$  осуществляется в два этапа. На первом этапе рассчитываются гидродинамические параметры. На втором этапе на основе рассчитанных гидродинамических полей решаются уравнения диффузии.

В качестве примера приведено моделирование рассеивания метана (основного компонента биогаза) на полигоне «Центральный» Волгоградской области в 2007 г. Моделирование производилось в программной среде Mat lab/Femlab. Набивающий поток принят по логарифмической зависимости, значения  $k_\phi = 4 \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\varepsilon = 0,2$ . На рис. 1 изображены поля скоростей ветра и концентраций метана.

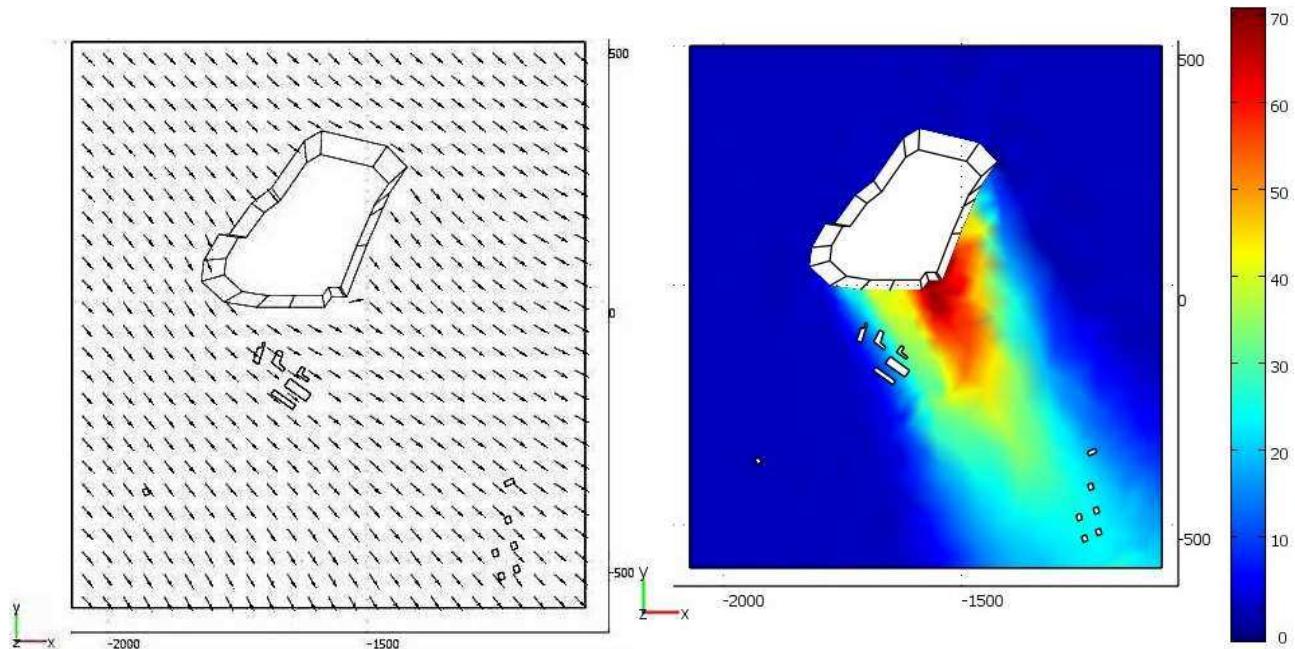


Рис. 1. Поле скоростей ветра при обтекании полигона (слева) и поле концентраций метана в зоне влияния свалки «Центральный» (справа)

Табл. 2. Сравнение значений концентраций метана в зоне влияния полигона ТБО «Центральный» в 2007 г., полученных различными способами

Контрольная точка	Значения концентраций метана, доля ОБУВ		
	экспериментальное	расчётное по ОНД-86 [5]	расчётное с помощью предложенной модели
Санитарно-защитная зона, 10 м от полигона	72±14,4	5,5	67,2
Санитарно-защитная зона, 50 м до полигона	21,2±4,2	17,5	23,1
Центр пос. Овражный	22,5±4,5	23,5	24,0

**В заключение** отметим, что моделирование на основе решений уравнений Навье-Стокса и диффузии даёт результат значительно лучше, чем методика ОНД-86. Результаты расчёта по предложенной модели близки к опытным данным. Моделирование выбросов биогаза на стадии эксплуатации, рекультивации полигонов можно рассматривать как один из аспектов

информационного моделирования, направленного на обеспечение экологической безопасности при обращении с ТБО и ПО.

### **Список литературы**

1. Батракова Г.М, Бояршинов М.Г. Горемыкин В.Д. Моделирование переноса и рассеивания в атмосфере воздухе метана, эмитированного с территории захоронения твёрдых бытовых отходов // Вестн. Воронежского ун-та. Геология. – 2005. – №1. – С. 256-261.
2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.
3. Дацюк Т.А. Моделирование рассеивания вентиляционных выбросов. – Спб. : СПБГАСУ, 2000. – 210 с.
4. Сауц А.В. Граничные условия численного моделирования рассеивания биогаза над полигоном // Инженерно-экологические системы : материалы Междунар. конгресса, посвящённого 180-летию СПБГАСУ. – Спб. : СПБГАСУ, 2012. – С. 155-158.
5. Сауц А.В. Об энергетическом обследовании возобновляемых источников энергии. Тепловизионное обследование полигонов ТБО и ПО [Электронный ресурс] // Технологии Энергосбережения. Статьи экспертов. – 2013. – Режим доступа: <URL://spbtes.ru/expert/ob-energeticheskem-obsledovanii-vozobnovlyayemyh-istochnikov-energii-teplovizionnoe> (дата обращения: 29.03.13).
6. Сауц А.В. Обоснование санитарно-защитных зон полигонов твёрдых бытовых и промышленных отходов при их строительстве и эксплуатации // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 4(33) – С. 200-202.

### **Рецензенты:**

Дацюк Тамара Александровна, доктор технических наук, профессор, декан факультета инженерной экологии и городского хозяйства, заведующий кафедрой общей и строительной физики, ФГБОУВПО «СПБГАСУ», г. Санкт-Петербург.

Ивочкина Нина Михайловна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математики. ФГБОУВПО «СПбГАСУ», г. Санкт-Петербург.