

УДК 681.5:[504.06+628.47]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛИГОНОВ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ

¹Еланцева Е.Н., ¹Серда Т.Г., ¹⁻³Костарев С.Н.

¹ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет
им. ак. Д.Н. Прянишникова», Пермь, e-mail: iums@dom.raid.ru;

²ФГКВООУ ВО «Пермский военный институт ВНГ Российской Федерации», Пермь;

³ФКОУ ВО «Пермский институт ФСИН», Пермь

В настоящей статье обоснована необходимость сокращения зоны воздействия от полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) методами рационального проектирования и эффективного управления. В качестве управляемых факторов выделены физико-химические характеристики отходов и продуктов их биодеструкции, а также выбор инженерных сооружений полигона ТКО в пределах отчужденной под строительство полигона ТКО территории. Показано, что нагрузка и воздействие на окружающую среду высоконагружаемого полигона будет распространяться на более дальние расстояния и на протяжении более длительного времени даже после его рекультивации, и этот факт должен учитываться при прогнозировании зоны воздействия таких полигонов для уточнения (обоснования) размеров санитарно-защитной зоны. Для минимизации загрязнения атмосферного воздуха от полигона ТКО на границе ближайших территорий до нормируемых показателей качества среды обитания, разработана пространственно-динамическая модель управления эмиссией выбросов с полигона ТКО. Поток рассматривался однофазным с учетом процесса рассеивания загрязнений CO_x в атмосфере, принята к-Epsilon модель турбулентности. Разработана математическая модель, базирующаяся на законах сохранения массы, импульса, энергии и замыкающаяся уравнениями состояния идеального сжимаемого газа и турбулентности. Проведен численный расчет эмиссии примесей в атмосфере с помощью средств AnsysWorkbench.

Ключевые слова: полигоны, твердые отходы, ТКО, санитарно-защитная зона, зона воздействия, загрязняющие вещества

MODELING OF ENVIRONMENTAL QUALITY MANAGEMENT PROCESSES IN THE ZONE OF IMPACT OF THE LANDFILL MUNICIPAL SOLID WASTE

¹Elantseva E.N., ¹Sereda T.G., ¹⁻³Kostarev S.N.

¹Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov,
Perm, e-mail: iums@dom.raid.ru;

²Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, Perm;

³Perm Institute of the FPS of Russia, Perm

This article substantiates the need to reduce the impact zone from solid municipal waste (MSW) landfills by methods of rational design and efficient management. The physicochemical characteristics of the waste and products of their biodegradation as well as the choice of the engineering facilities of the MSW landfill within the TKO territory alienated under the construction have been identified as controlled factors. It is shown that the load and environmental impact of a highly loaded landfill will extend to longer distances and for a longer time even after its reclamation and this fact should be taken into account when predicting the impact zone of such polygons to clarify the MSW dimensions. To minimize air pollution from the MSW landfill at the border of the nearest territories to the standardized indicators of habitat quality, a model for managing emission of emissions from the MSW landfill has been developed. Numerical calculation of the dispersion of impurities in the atmosphere is carried out using the tools AnsysWorkbench.

Keywords: polygons, solid waste, solid municipal waste, sanitary protection zone, impact zone, pollutants

Различные комплексы мер по управлению процессами на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО) [1, 2] могут привести к разным результатам, поэтому необходимо уже на этапе проектирования полигона определить и произвести действия по уменьшению его негативного воздействия на население и окружающую среду.

Действенной мерой является необходимое удаление объектов размещения отходов от мест проживания населения. В этом случае расстояние сыграет защит-

ную (буферную) роль по отношению к населенным местам. Такой способ снижения экологической нагрузки на население можно считать наилучшим относительно настоящего и ближайшего будущего времени. Однако необходимо задумываться и о более отдаленном будущем в связи с расширением территории городской застройки.

Методы исследования

При обосновании методов и алгоритмов управления полигоном ТКО исполь-

зовались методы системного анализа, теория автоматического управления, методы математического и имитационного моделирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Города и другие населенные пункты имеют свойство расти, развиваться, охватывая все большие площади, занимая территории, ранее пустовавшие или использовавшиеся в других целях. В частности, буферные зоны могут попасть под застройку через несколько десятков лет. Несмотря на то, что строительство жилья может быть осуществлено только при условии содержания загрязнителей в компонентах окружающей среды в рамках предельно допустимых концентраций, наличие неприятного запаха в атмосферном воздухе или привкуса в воде может ощущаться даже при соблюдении гигиенических нормативов. Население таких районов будет вынуждено мириться с несовершенством экологического состояния окружающей среды, хотя возможно было еще на ранних этапах проектирования применить не только защиту расстоянием, но и другие эффективные меры по снижению негативного воздействия полигонов ТКО.

Ограничение использования территории в зоне воздействия полигона может нанести также экономический ущерб, препятствуя эффективному использованию территории. Поэтому следует стремиться не только к обеспечению удовлетворительных условий проживания в существующих ближайших к полигону населенных местах. Необходимо изначально задавать такие параметры функционирования полигона, при которых его воздействие на все компоненты окружающей среды будет минимальным. Иначе говоря, необходимо максимально сократить зону воздействия от полигонов ТКО методами рационального проектирования и эффективного управления.

Применяемые технологии в области захоронения ТКО разнятся между собой не только в экономическом отношении, но и в отношении длительности окончательного возвращения продуктов биоразложения в естественный биогеохимический цикл, а также по возможному расстоянию (объему) зоны воздействия полигона ТКО в течение всего периода биодеструкции отходов. Необходимость скорейшего возврата земель, находящихся в зоне воздействия полигона, в хозяйственный оборот диктует необходимость внедрения технологий, обеспечивающих наименьшее загрязнение

объектов биосферы [3] в эксплуатационный период полигона ТКО и обеспечивающих наиболее быстрое восстановление земель в период его рекультивации [4].

Для того, чтобы выбрать оптимальный для каждого конкретного случая способ управления, следует в первую очередь выделить факторы, влияющие на конечный результат. Во-вторых, из общего перечня факторов нужно выбрать те, управляя которыми можно достичь наилучшего результата и подобрать технологические, конструктивные и планировочные методы управления полигоном ТКО. При поставленной задаче по уменьшению воздействия полигона ТКО на окружающую среду в конкретном заданном ландшафте следует отталкиваться от имеющихся климатических, гидрологических, геоморфологических, геологических, биологических и хозяйственных условий и подбирать технологические и конструктивные решения, согласующиеся с ними.

Среди факторов, влияющих на количество и качественный состав загрязняющих веществ от полигонов, в [5] названы: рабочая (активная) площадь полигона, сроки эксплуатации полигона, количество захороненных отходов, мощность слоя складированных отходов (высота от уровня земли), соотношение количеств завезенных бытовых и промышленных отходов, содержание органической составляющей в отходах, содержание жироподобных, углеводородных и белковых веществ в органической составляющей отходов.

Степень управляемости указанными факторами может варьировать от высокой в случае, если полигон проектируемый, до средней или низкой в случае, если полигон уже рекультивирован. В качестве управляемых факторов можно выделить такие физико-химические характеристики, как влажность поступающих на полигон отходов, их морфологический состав, плотность, гранулометрический состав, химический состав фильтрата и свалочного газа, а также планировку сооружений полигона ТКО в пределах выделенной территории.

При проектировании высоконагружаемых полигонов ТКО (высота которых достигает 20 м и нагрузку на площадь более 10 т/м² (100 тыс. т/га)), наряду с экономией земельных ресурсов происходит предельное увеличение нагрузки на единицу площади занимаемой земли. Согласно действующей редакции СанПиН [6], ориентировочный размер санитарно-защитной зоны (СЗЗ) для всех полигонов твердых бытовых (коммунальных) отходов

составляет 500 м. Однако нагрузка и воздействие на окружающую среду высоконагружаемого полигона по сравнению с менее нагружаемыми будет распространяться на более дальние расстояния и на протяжении более длительного времени даже после его рекультивации, хотя этот факт до сих пор не учитывался при обосновании СЗЗ у высоконагружаемых полигонов ТКО. Также необходимы проектные решения по снижению повышенной негативной нагрузки высоконагружаемых полигонов на окружающую среду и сокращение зоны их воздействия на окружающую среду. В то же время для малых полигонов ТКО требуется проектный расчет зоны воздействия таких полигонов для уточнения (обоснования) СЗЗ. Зона воздействия полигона определяется в основном рассеиванием выбрасываемых загрязняющих веществ в атмосферном воздухе с учетом фоновых концентраций при условии, что на полигоне ТКО предусмотрен защитный противодиффузионный экран, воздействие складываемых на нем отходов на почву, недра, подземные и наземные водные объекты минимизировано, и объект работает в штатном режиме.

Ранее нами определялись параметры объекта размещения и обезвреживания отходов [7], оказывающие наиболее значимое воздействие на загрязнение атмосферного воздуха на границе ближайших территорий с нормируемыми показателя-

ми качества среды обитания. Для этого рассматривалась совокупность вариантов параметров объекта размещения и обезвреживания отходов, при которой воздействие объекта на состояние атмосферного воздуха на границе ближайших территорий с нормируемыми показателями качества среды обитания было минимальным. На основе этих исследований разрабатывалась математическая модель оптимизации размещения объекта и обезвреживания отходов к границам ближайших территорий с нормируемыми показателями качества среды обитания. Объектом исследования являлись выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от местности проектируемого полигона отходов (рис. 1).

Механизм управления полигоном заключается в поддержании потока эмиссии загрязняющих веществ, не превышающем ПДК на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ), а в качестве управляющих параметров будут выступать физико-химические параметры массива, оказывающие влияние на эмиссию, изученные ранее. В качестве критерия управления полигоном предложено использовать показатель относительного отклонения потока эмиссии загрязняющих веществ:

$$\int_{t_0}^{t_k} \int_{x_0}^{x_k} \int_{y_0}^{y_k} |q(x, y, t)| dx dy dt \rightarrow \min. \quad (1)$$

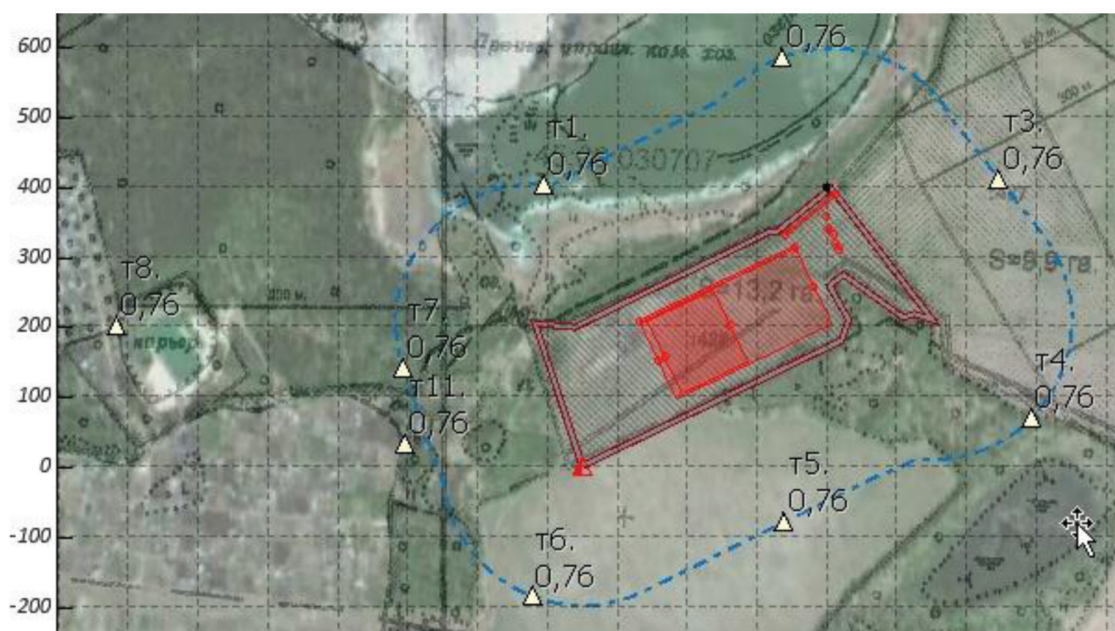


Рис. 1. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от полигона отходов. Масштаб 1:10000

Управление полигоном с обратными связями по отклонению величин потока $q(x, y, t)$ и концентрации загрязнений $\rho(x, y, t)$ от необходимого режима формализовано системой уравнений [8], характеризующих состояние объекта в отклонениях от заданного режима и управление объектом с помощью скорости v или интенсивности потока q выбросов в атмосферу:

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial \rho(x, y, t)}{\partial x} - \frac{\partial \rho(x, y, t)}{\partial y} + b(x, y, t) \\ v(x, y, t) = -k_1(x, y, \tau) \int_t q(x, y, t) dt \end{cases} \quad (2)$$

$$x_0 \leq x \leq x_k, y_0 \leq y \leq y_k, t \geq t_0, q(x_0, y_0, t) = q_0(t),$$

$$q(x_k, y_k, t) = q_k(t), \rho(x, y, t_0) = \rho_0(x, y),$$

$$\rho_x = vq_x, \rho_y = wq_y.$$

В основе описания рассеивания загрязнений в атмосфере положено уравнение движения Эйлера (сохранения массы) с учетом возмущений $b(x, y, t)$, вызываемых внешними и внутренними факторами. При формировании модели воздействия полигона на атмосферный воздух предполагается, что перенос загрязняющих субстанций в атмосфере осуществляется ветровыми потоками воздуха с учетом их мелкомасштабных флуктуаций. Осредненный поток субстанций, переносимых воздушными массами, как правило, имеет адвективную и конвективную составляющие, а осредненные флуктуационные движения можно интерпретировать как диффузию на фоне основного осредненного движения, связанного с ним.

Аналитическое решение задачи управления эмиссионным потоком

На перенос примесей в основном будут влиять ветровые потоки воздуха, если предположить, что скорость ветра в направлении оси y $w = 0$, тогда уравнение движения в частном случае запишется в виде

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} + b(x, t). \quad (3)$$

Мелкомасштабные флуктуации воздушных масс можно описать возмущением $p(\xi, t)$, где (x, ξ) , (t, τ) – сопряженные переменные.

Введя функцию управления выбросами с полигона $u(x, t)$ запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} + b(x, \tau) & \text{объект} \\ q(x, t) = -u(x, t) + p(\xi, t) & \text{управление} \end{cases} \quad (4)$$

Представим функцию управления, как пропорциональный регулятор:

$$u(x, t) = k_1 q(x, t) + k_2 \rho(x, t).$$

Подставляя функцию управления в (4) и разделяя переменные, получим

$$\begin{cases} q'_t(1 - k_1) + k_2 q'_x = -k_2 b + p'_t, \\ \rho'_t(1 - k_1) + k_2 \rho'_x = -(1 - k_1) b + p'_x. \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений (5) имеет аналитическое решение при известных начальных и краевых условиях, которое может быть получено на основе импульсной функции Дирака [9]. Функция Грина (6) является решением уравнения для рассматриваемой краевой задачи

$$q(x, t) = \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x G(x, \xi, t, \tau) \omega(\xi, \tau) d\xi d\tau. \quad (6)$$

Для системы (5) значения функций G и ω имеют следующий вид:

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{\beta} \exp\left[-\frac{\phi}{\beta}(x - \xi)\right] \delta\left[t - \frac{\alpha}{\beta}(x - \xi)\right] 1(x - \xi)$$

$$\omega(x, t) = \alpha c(x) \delta(t) - \beta q(t) \delta(x) + f(x, t).$$

В одномерном случае δ -функция равна

$$\delta(f(x)) = \sum_k \frac{\delta(x - x_k)}{|f'(x_k)|},$$

где x_k – простые нули функции $f(x)$, $f'(x)$ – непрерывна в точке x_k .

При использовании полиномиальной формы δ -функции при формализации функции возмущений $p(\xi, t)$, $b(x, \tau)$ решение для управления эмиссионным потоком биогаза q от колебания количества загрязнений при реакции с внешней средой $b(x, \tau)$ примет вид

$$q(x, t) = \frac{1}{\alpha} \int_{t_0}^t \frac{k_2 \delta(\tau)}{\xi_1^2 + 1} d\tau.$$

Проведя интегрирование, получим

$$q(x, t) = \frac{\alpha k_2}{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2}$$

при $\alpha = 1 - k_1$, $\beta = k_2$.

Управление эмиссионным потоком биогаза от флуктуации воздушных масс $p(\xi, t)$, опишется уравнением:

$$q(x, t) = \frac{2t}{\sqrt{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2}} \times \times \text{arctg} \frac{\alpha t}{\sqrt{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2}}.$$

Таким образом, управляя эмиссионным потоком биогаза, можно регулировать предельно допустимую концентрацию загрязнений на границе селитебной зоны.

Имитационное моделирование эмиссии загрязняющих веществ

Исследуя метеорологические характеристики района расположения полигона, были определены исходные данные для проведения моделирования загрязнения атмосферы: средняя температура наружного воздуха 25,2°C, коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы 160,0. Коэффициент рельефа 1,0. Задан порог целесообразности проведения расчетов по вкладу источников выброса 0,01 ПДК.

Численное моделирование

В соответствии с принятой физической моделью проведено численное моделирование, которое базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии и замыкается уравнениями состояния идеального сжимаемого газа и турбулентности, а также начальными и граничными условиями. Сформулированы следующие допущения: поток

рассматривается однофазным, учитывается процесс рассеивания загрязнений CO_x в атмосфере, принята k-Epsilon модель турбулентности. При формировании физической модели в качестве принятого допущения не учитывалось влияние гравитации. В контексте данных исследований рассматривалась задача анализа газодинамических характеристик потока рассеивания загрязнений CO_x в атмосфере от массива отходов (МО) полигона. Модель содержала твердую область МО и кольцевую область, которая представляла границу мониторинга атмосферы. Конструкция трехмерная, её модель и сеточная модель построены с помощью средств AnsysWorkbench [10]. Были созданы домены MSW и Atmosfera. На рис. 2 и 3 показаны граничные условия для доменов.

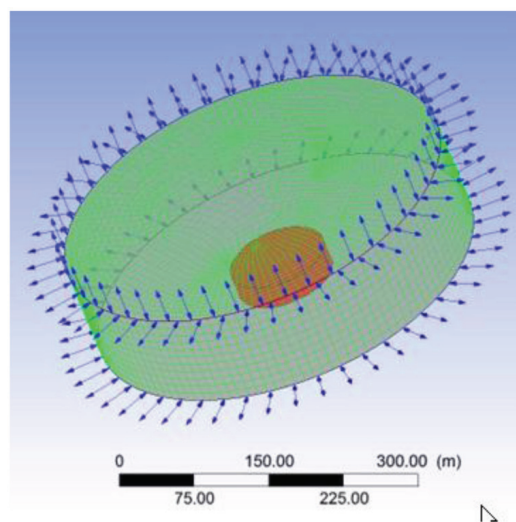


Рис. 2. Создание граничных условий для домена Atmosfera

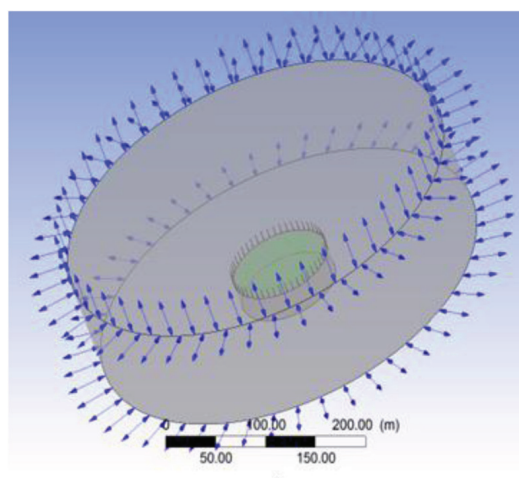


Рис. 3. Создание граничных условий для доменов MSW и Atmosfera

Проведено моделирование процесса нестационарной симуляции в ANSYS CFX-Pre (рис. 4).

Результаты численного моделирования рассеивания CO_x показали, что на границе зоны мониторинга атмосферы (250 м) концентрация CO_x варьируется в пределах от 0,05 мг/м³ до 0,2 мг/м³ и не превышает ПДК, значение которой составляет 5,0 мг/м³.

Расчёт по методике оценки концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий

Для сравнения проведен расчёт загрязнения атмосферы по веществу «Углерод оксид», выполненный в соответствии с [11], с использованием унифицированной программы расчёта загрязнения атмосферы УПРЗА «ЭКО центр».

Для проведения расчета загрязнения атмосферы в первую очередь были определены максимально разовые выбросы оксида углерода от всех источников выбросов полигона на момент окончания его эксплуатации: котельной, ДВС передвигающихся и работающих под нагрузкой автомобилей и спецтехники, площадки для складирования отходов. Определены координаты расположения источников выбросов на карте-схеме. Принято, что все источники работают одновременно. Заданы 12 расчетных точек на высоте 2 м над землей на границе санитарно-защитной зоны и ближайших мест

с нормируемыми показателями качества атмосферного воздуха. Кроме этого, задана расчетная площадка 3000×2000 м с шагом 100 м (всего узлов расчётной сетки – 651). Проведены детальные расчеты рассеивания оксида углерода в атмосфере. Ситуационная карта-схема района размещения предприятия с нанесенными изолиниями расчётных концентраций, выраженных в долях ПДК, по расчётной площадке приведена в масштабе 1:20000 на рис. 5. Значения приземных концентраций в каждой расчётной точке в атмосферном воздухе представляют собой суммарные максимально достижимые концентрации, соответствующие наиболее неблагоприятным метеорологическим условиям. Значения максимальных концентраций в расчётных точках приведены на рис. 5.

Анализ результатов моделирования

Результаты расчета показали, что концентрация оксида углерода на границе санитарно-защитной зоны и на границе ближайших территорий с нормируемыми показателями качества атмосферного воздуха не превысит нормативный гигиенический критерий 5 мг/м³ и составит от 0,001 до 0,004 ПДК, или от 0,0073 до 0,02 мг/м³. Результаты численного моделирования показали уровень загрязнений от 0,05 мг/м³ до 0,2 мг/м³, что также соответствует нормативным нормам.

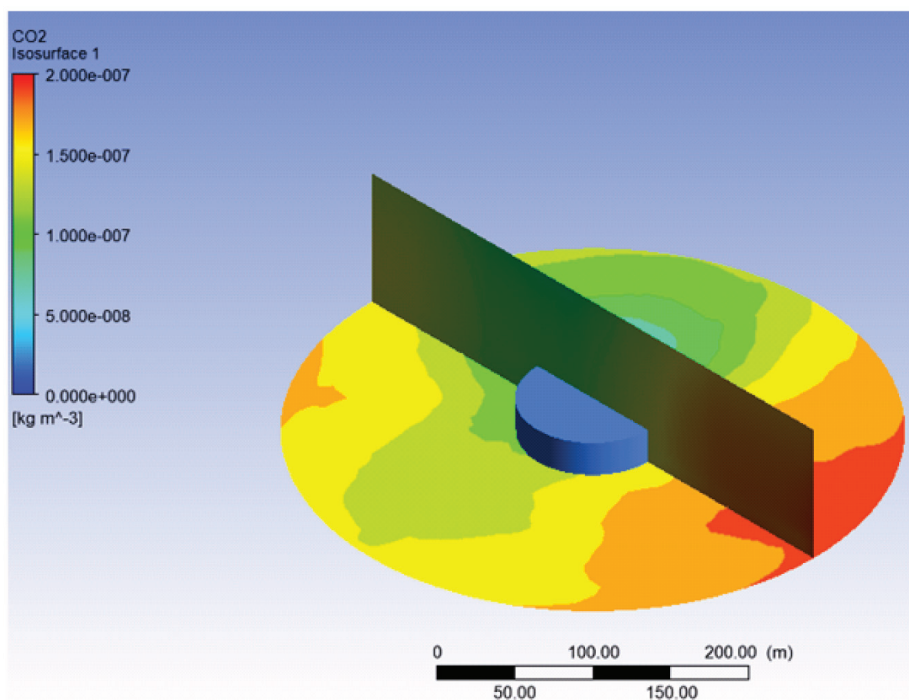


Рис. 4. Исоповерхность рассеивания CO_x

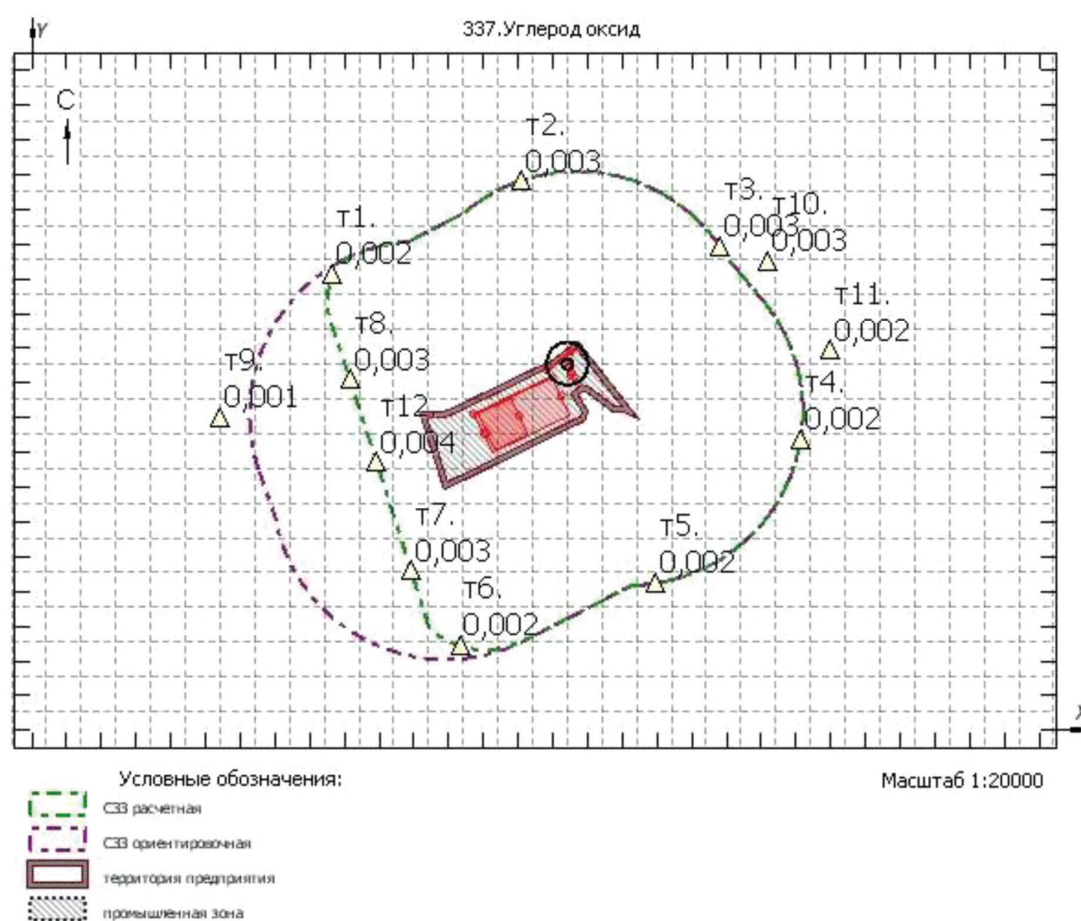


Рис. 5. Карта-схема полигона ТБО с результатами расчета рассеивания оксида углерода

Выводы

При определении CЗЗ следует учитывать, что в соответствии с методикой [10] для совокупности источников выбросов отдельных предприятий рассчитываются зоны влияния, включающие в себя круги определенного радиуса, проведенные вокруг каждого из основных источников выброса (труб или других источников) предприятия, и участки местности, на которых суммарная концентрация загрязняющего вещества (ЗВ) от всей совокупности источников данного предприятия превышает 0,05 максимальной разовой предельно допустимой концентрации. Зоны воздействия должны рассчитываться по каждому ЗВ (группе ЗВ комбинированного вредного действия) отдельно.

Таким образом, предлагаемые модели рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе для определения зоны влияния полигонов ТКО позволяют уже на проектном этапе обосновать

методы и технологии управления (сокращения) выбросами загрязняющих веществ в пределах CЗЗ.

Список литературы

1. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для ТБО // Твердые бытовые отходы. – 2006. – № 8. – С. 52–60.
2. Технологии автоматизированного управления полигоном твердых бытовых отходов / Н.И. Артемов [и др.]. – Пермь: НИИУМС, 2003. – 266 с.
3. Кияшко Л.Ю., Сергеев Н.В., Елизарьева А.Н. Комплексный подход при оценке влияния захоронений твердых бытовых отходов на водные объекты // Проблемы обеспечения безопасности (Безопасность-2016): материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2016. – С. 231–247.
4. Виноградова Л.А., Моторная Н.Г. Управление твердыми бытовыми отходами в микрорайоне Крутая горка // Решение экологических проблем современного общества для устойчивого развития: материалы науч.-практ. конф. – Омск: Литера, 2016. – С. 129–133.
5. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов. – М., 2004. – 20 с.

6. Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов (с изменениями на 25 апреля 2014 года). – М., 2014. – 27 с.
7. Еланцева Е.Н., Костарев С.Н., Серeda Т.Г. Оценка фонового содержания приоритетных загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на предпроектной стадии строительства объекта по захоронению твердых бытовых отходов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–2 [Электронный ресурс]. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=22101> (дата обращения: 05.03.2018).
8. Sereda T.G., Kostarev S.N. Three-loop automatic of control system the landfill of household solid waste. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, vol. 66. P. 012028.
9. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977. – 156 с.
10. Костарев С.Н., Серeda Т.Г., Еланцева Е.Н. Численное моделирование процесса рассеивания загрязнений в атмосфере // Вестник ПНИПУ. Безопасность и управление рисками. – 2016. – № 4. – С. 88–107.
11. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: приказ Минприроды России от 06.06.2017 № 273 [Электронный ресурс]. – URL: <https://cdning.rg.ru/pril/143/84/68/47734.pdf> (дата обращения: 22.03.2018).