

УДК 614.8

А.Н. Соболев, Ю.А. Олениченко, Т.В. Марусенко

Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков

**РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ
КАК ОДНА ИЗ БАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ
ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ОБЪЕКТОВ ДАННОГО КЛАССА**

В работе рассмотрена задача расчета тепловых полей полигонов твердых бытовых отходов методом конечных элементов с использованием конечно-элементного пакета ANSYS. Сформулированы ограничения и граничные условия для задач данного класса. Получены распределения температурных полей для различных природно-климатических режимов формирования верхнего слоя полигона твердых бытовых отходов. Рассмотрен температурный режим в случае заноса открытого огня.

Ключевые слова: *твердые бытовые отходы, полигоны, техногенная авария, тепловой анализ, метод конечных элементов.*

Введение

Постановка проблемы. Проблема накопления твердых бытовых отходов (ТБО) приобретает в Украине масштаб национальной катастрофы. Общая площадь полигонов и свалок (более 6 тыс. га) сравнима с территориями заповедников и парков. Количество свалок и полигонов 3614. Большинство этих объектов перегружены и не отвечают требованиям техногенной и экологической безопасности. Не менее важной проблемой является неготовность лич-

ного состава аварийно-спасательных подразделений МЧС Украины к проведению, как профилактических мероприятий, так и мероприятий по ликвидации аварий на данных объектах.

Проблематика данной работы вызвана отсутствием системного изучения вопроса связанного с повышением пожарной и техногенной безопасности полигонов ТБО, и направлена в первую очередь на систематизацию и обоснование комплекса факторов (ограничений) игнорирование которых при проведении профилактических мероприятий и ликвида-

ции аварий может привести к опасному разрастанию чрезвычайной ситуации.

Анализ последних исследований. Научные исследования, направленные на разработку современных технологий обращения с отходами носят эпизодический характер [3, 4]. Научные исследования, связанные с повышением пожарной и техногенной безопасности полигонов на сегодня практически отсутствуют. Методические рекомендации по обращению с ТБО, утвержденные в феврале 2010 г. МинЖКХ Украины, ориентированы на их захоронение без учета возможной переработки и анализа последних научных достижений в этой сфере.

Изложение основного материала

Исходя из заявленной проблематики, целью работы явилось проведение систематизации и обоснование ограничений с последующей их формализацией для комплексной задачи оптимального размещения ТБО на уже существующих полигонах с целью минимизации возможности возникновения техногенной аварии с одной стороны, и повышения эффективности действий аварийно-спасательных подразделений при проведении мероприятий по ликвидации возможной аварии с другой стороны. Такой подход предполагает проведение декомпозиции на начальном этапе постановки задачи исследования, а именно разделение задачи на «профилактическую» и «ликвидационную» составляющие.

Решению как первой, так второй задачи должно предшествовать решение задачи комплексного теплового анализа сложного неоднородного объекта, каким являются полигоны ТБО.

Для решения поставленной задачи нами выбраны метод конечных элементов, реализуемый в виде программного продукта ANSYS.

Первичный анализ имеющихся условий показал, что в случае с полигоном ТБО имеет место меняющийся во времени отклик системы, который сопровождается следующими тепловыми процессами:

- температуры изменяются со временем,
- тепловой поток изменяется со временем,
- тепловые нагрузки могут изменяться со временем,
- изменения внутренней энергии очевидны.

В данном случае должна быть решена задача нестационарной теплопроводности.

Основой для получения разрешающих уравнений является закон сохранения энергии. Для некоторой сосредоточенной массы или элементарного объема количество подводимой энергии минус количество отводимой энергии равно изменению внутренней энергии, или в алгебраической форме:

$$Q_{\text{подводимая}} + Q_{\text{генерируемая}} - Q_{\text{отводимая}} = Q_{\text{накопленная}}.$$

Для элементарного объема это соотношение в дифференциальной форме имеет вид:

$$\rho c \frac{dT}{dt} + \nabla q'' = q'''.$$

Используя закон Фурье, уравнение можно записать в таком развернутом виде:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q''' = \rho c \frac{dT}{dt}.$$

В соответствии с ранее указанной процедурой можно получить следующую систему уравнений

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\},$$

где $[K]$ – матрица теплопроводности; $[C]$ – матрица удельных теплоемкостей (или емкостей); $\{T\}$ – узловые температуры; $\{\dot{T}\}$ – производная температуры от времени $\{T\}$; $\{Q\}$ – вектор узлового теплового потока.

Для получения значений температуры $\{T\}$ используется следующий способ интегрирования по времени:

$$\{T_{n+1}\} - \{T_n\} = \Delta t_n (1 - \Theta)\{\dot{T}\} + \Delta t_n \Theta \{\dot{T}_{n+1}\}.$$

Этот прием известен как способ Эйлера (или метод трапеций) для интегрирования по времени. В данном случае: $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$ – шаг интегрирования по времени между точками n и $n + 1$; $\{T_n\}$, $\{T_{n+1}\}$ – значения температур в моменты времени n и $n + 1$; $\{\dot{T}_n\}$, $\{\dot{T}_{n+1}\}$ – производные температур; Θ – параметр Эйлера.

Величина параметра Θ определяет метод интегрирования по времени. В программе ANSYS параметр Θ удовлетворяет соотношению $\frac{1}{2} \leq \Theta \leq 1$. При $\Theta = \frac{1}{2}$ имеет место схема интегрирования Кранка-Николсона, при $\Theta = 1$ – обратный метод Эйлера.

Система уравнений для нестационарной теплопроводности принимает вид:

$$[\bar{K}]\{\Delta T\} = \{Q\},$$

где $\{\Delta T\} = \{T_{n+1}\} - \{T_n\}$; $[\bar{K}]$ – эквивалентная матрица теплопроводности, которая зависит от матрицы теплопроводности $[K]$ и удельной теплоемкости $[C]$; $\{\bar{Q}\}$ – эквивалентный вектор теплового потока, учитывающий $\{Q\}$, $\{T_n\}$ и $\{\dot{T}_n\}$.

Конкретный вид указанных эквивалентных величин следующий:

$$[\bar{K}] = \frac{1}{\Theta \Delta t} [C] + [K];$$

$$\{\bar{Q}\} = \{Q\} + \frac{1 - \Theta}{\Theta} [C]\{\dot{T}_n\} - [K]\{T_n\}.$$

В нашем случае имеет место следующие условия:

- зависимость свойств материалов в составе отходов от температуры;
- зависимость от температуры граничных условий (сезонные и суточные колебания температуры).

Таблица 1

Интегральные теплофизические характеристики ТБО при различных погодно-климатических условиях формирования верхнего слоя

| №№ | Формируемые параметры ТБО и окружающей среды | Интегральные теплофизические характеристики | | | |
|----|---|---|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| | | ρ , [Кг/м ³] | C , [Дж/Кг ⁰ С] | κ , [Вт/м ⁰ С] | h , [Вт/м ²⁰ С] |
| 1 | Е1 (относительная влажность – 0%, диоксид углерода – 0%, метан – 0%, уплотнение – 100 %) | 1611 | 2050 | 2,991 | 0,907 |
| 2 | Е2 (относительная влажность – 47%, диоксид углерода – 0,6%, метан – 0,8%, уплотнение – 53 %) | 1324 | 3052 | 1,867 | 0,988 |
| 3 | Е3 (относительная влажность -0%, диоксид углерода – 0%, метан – 0%, уплотнение – 4-х кратное) | 800 | 2050 | 2,991 | 0,907 |
| 4 | Е4 (относительная влажность – 47%, диоксид углерода – 0%, метан – 0%, уплотнение – 4-х кратное) | 894 | 3052 | 1,867 | 0,988 |
| 5 | Е5 (относительная влажность – 33%, диоксид углерода – 0%, метан – 0%, уплотнение – 4-х кратное) | 866 | 2753 | 2,202 | 0,964 |

Все это приводит к нелинейному тепловому анализу. Также к условиям нелинейности в контексте нашей задачи стоит добавить:

- зависимость от температуры коэффициента теплоотдачи, используемого для расчета конвекции;
- использование конечного элемента с обратной связью или элемента управления с опциями включения/выключения.

В результате получаем следующую систему разрешающих уравнений:

$$[\bar{K}^{(i-1)}]\{\Delta T^{(i)}\} = \{Q^{(i)}\} - \{\bar{P}^{(i-1)}\},$$

где $[\bar{K}]$ – эквивалентная матрица теплопроводности; $\{\bar{P}\}$ – эквивалентный вектор внутреннего теплового потока и $\{T_{n+1}^{(i)}\} + \{T_n^{(i-1)}\} + \{\Delta T^{(i)}\}$.

Стоит отметить, что в данном случае требуется задание двух граничных условий в каждом направлении (трехмерная задача) с одним начальным условием. Условия симметрии не применимы.

Учитывая усредненный морфологический состав твердых бытовых отходов [1] нами получены интегральные теплофизические характеристики технологических слоев ТБО с учетом различных фаз накопления и погодно-климатических условий формирования верхнего слоя (табл.1).

Предварительный анализ [2] показал, что наибольшую сложность при проведении профилактической работы и ликвидации техногенной аварии вызывает отвал формируемого слоя не прикрытый санитар-

ным слоем земли. Учитывая отсутствие, вследствие неоднородности масс, симметрии конечно элементная модель представлена на (рис. 1). Характерный размер элемента принят равным 1/14 наименьшего технологического размера полигона [2].

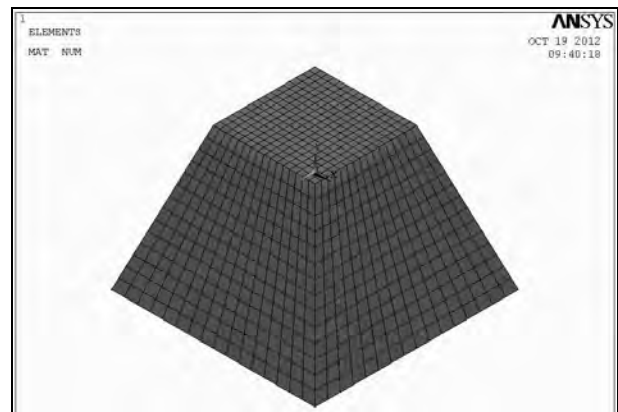


Рис. 1. Общий вид конечно-элементной модели формируемого слоя полигона ТБО

Учитывая линейное распределение температур по глубине устоявшегося подстилающего слоя, находящегося в 4 –ой фазе (анаэробное разложение с постоянным выделением метана) граничные условия по плоскости ($y = 0$) приняты $T = 333$ °К, теплофизические характеристики соответствуют элементам второй группы Е2 (табл.1). Для плоскости ($y = 1.8$) граничные условия приняты $T = 313$ °К,

что соответствует наиболее критической пожаро-опасной обстановке в весенне-летние месяцы года.

Тепловой анализ для случая заноса открытого огня (поступление на полигон горящего мусора [1]) ($T = 568 \text{ }^{\circ}\text{K}$) температура тления дерева рассмотрен для различных природно-климатических условий формируемого слоя (рис. 2 – 5). Показал, что глубина прогрева формируемого слоя соразмерна с высотой слоя, и имеет максимум на высоте 1/3 от санитарного слоя.

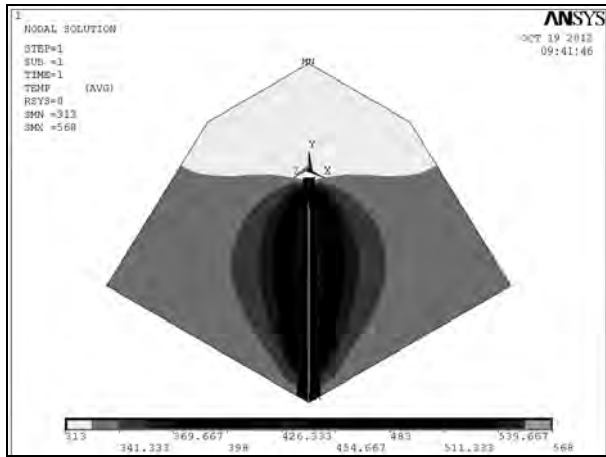


Рис. 2. Распределение узловых тепловых полей формируемого слоя полигона в условиях заноса открытого огня в отвал

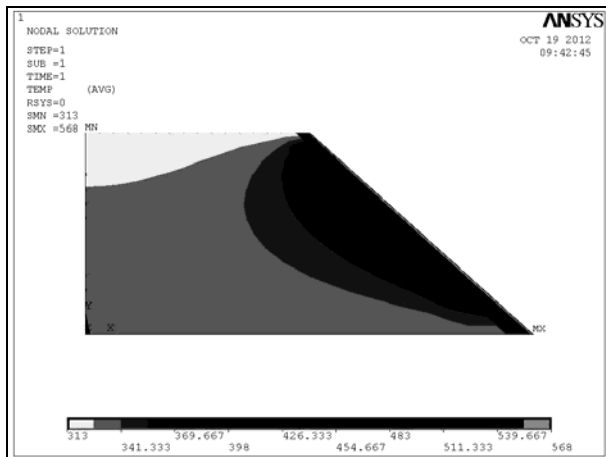


Рис. 3. Распределение узловых тепловых полей формируемого слоя полигона в условиях заноса открытого огня в отвал для элементов группы E4 (относительная влажность – 47%)

При уменьшении относительной влажности ТБО формируемого слоя (рис. 4 – 5) (сезонные колебания вызванные температурным режимом летнего периода) характер распределения температурного поля не изменяется, но глубина опасного прогрева, до температуры самовоспламенения метана, возрастает до 1,5 минимального технологического размера слоя и представляет сложную ликвидационную задачу (разрыв слоя с проливкой водой).

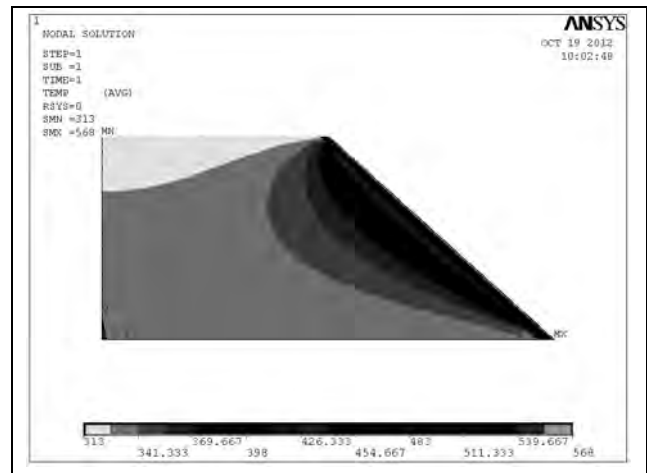


Рис. 4. Распределение узловых тепловых полей формируемого слоя полигона в условиях заноса открытого огня в отвал для элементов группы E5 (относительная влажность - 33%)

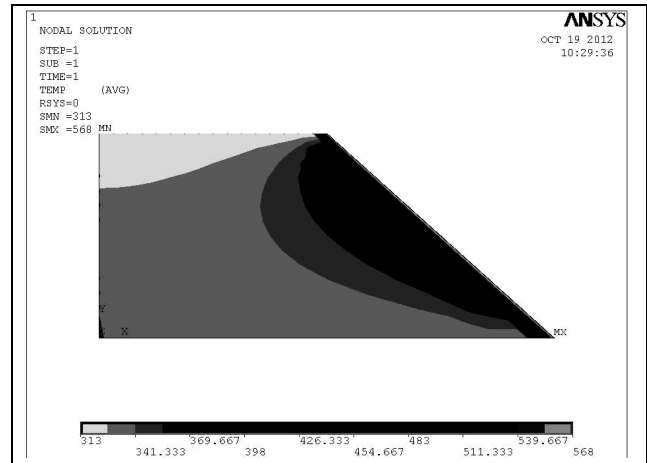


Рис. 5. Распределение узловых тепловых полей формируемого слоя полигона в условиях заноса открытого огня в отвал для элементов группы E3 (относительная влажность - 0%)

Тепловой анализ процесса начала развития пожара ($T = 723 \text{ }^{\circ}\text{K}$) представлен на рис. 6.

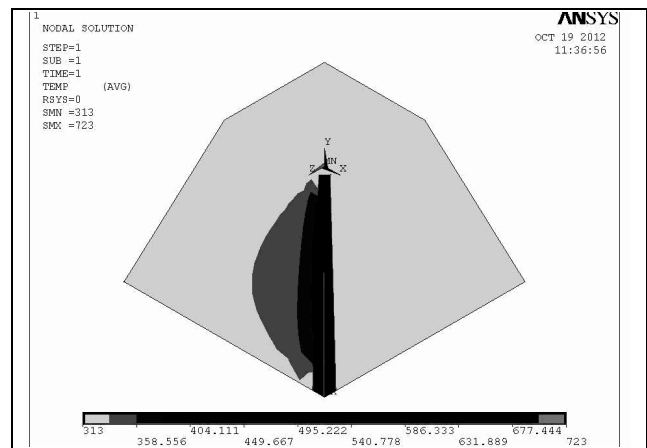


Рис. 6. Распределение узловых тепловых полей формируемого слоя полигона в условиях начала пожара в отвале для элементов группы E4

При этом одна из плоскостей отвала (xz) прикрита, согласно требованиям технологии формирования слоя, санитарным слоем земли.

Наблюдается резкая асимметрия глубины прогрева до критических температур самовоспламенения метана в направлении отсутствия санитарного слоя (нарушение технологии формирования) и в сторону подстилающего слоя анаэробного процесса, вследствие его дополнительного внутреннего прогрева.

Выводы

В данной работе выполнен анализ возможностей метода конечных элементов для проведения теплового анализа полигонов ТБО. Получены поля распределения узловых температур для сформированной конечно-элементной модели. Рассмотрены случаи заноса открытого огня в отвал формируемого слоя и начало развития пожара.

Дальнейшие исследования будут направлены на оценку результатов теплового анализа, как базы для построения последующих математических моделей задач предупреждения и ликвидации техногенных аварий на полигонах ТБО.

Список литературы

1. Олениченко Ю.А. Система ограничений в задачах предупреждения и ликвидации техногенных аварий на полигонах твердых бытовых отходов / Ю.А. Олениченко, А.Н. Соболев // Проблемы чрезвычайных ситуаций. – Х.: НУГЗУ, 2012, №15. – С. 104-116.
2. Соболев А.Н. Тепловой анализ полигонов твердых бытовых отходов в контексте решения задачи повышения техногенной безопасности объектов данного класса / А.Н. Соболев, Ю.А. Олениченко // 14-та Всеукраїнська науково-практична конференція рятувальників. – К.: ІДУСЦЗ, 2012, – С. 365-368.
3. Ягафарова Г.Г. Разработка матрицы прогнозирования выхода метана в составе биогаза из твердых бытовых отходов / Г.Г. Ягафарова, Л.А. Насырова, А.М. Шаимова // Башкирский химический журнал, 2007. – № 5, том 14. – С. 31-34.
4. Артёмов Н.И. Технологии автоматизированного управления полигоном твердых бытовых отходов / Н.И. Артёмов, Т.Г. Середя, С.Н. Костарев, О.Б. Низамудинов // Научно-исследовательский институт управляющих машин и систем. Пермь, 2003. – 266 с.

Поступила в редколлегию 20.04.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Калугин, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков.

РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ЯК ОДНА З БАЗОВИХ СОСТАВНИХ РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ ДАНОГО КЛАСУ

О.М. Соболев, Ю.А. Олениченко, Т.В. Марусенко

У роботі розглянута задача розрахунку теплових полів полігонів твердих побутових відходів методом кінцевих елементів з використанням кінцево-елементного пакету ANSYS. Сформовані обмеження та граничні умови для задач відповідного класу. Отримані розподіли температурних полів для різних природнокліматичних режимів формування верхнього шару полігону твердих побутових відходів. Розглянуто температурний режим у випадку внесення відкритого вогню.

Ключові слова: тверді побутові відходи, полігони, техногенна аварія, тепловий аналіз, метод кінцевих елементів.

CALCULATION OF THERMAL FIELDS OF LANDFILL OF THE SOLID HOUSEHOLD WASTE AS ONE OF BASE COMPONENTS IN THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF INCREASE OF TECHNOGENIC SAFETY OF OBJECTS OF THIS CLASS

A.N. Sobol, J.A. Olenichenko, T.V. Marusenko

In work the problem of calculation of thermal fields of landfill of a solid household waste by a finite-element method with use of a finite-element ANSYS package is considered. Restrictions and boundary conditions for problems of this class are formulated. Distributions of temperature fields for various climatic modes of formation of the top layer of the landfill of a solid household waste are received. The temperature mode in case of drift of open fire is considered.

Keywords: solid household waste, landfill, technogenic failure, thermal analysis, finite-element method