

УДК 681.5

РЕШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ПОЛИГОНА ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Середа Т.Г.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: iums@dom.raid.ru

К физическим процессам, протекающим в массиве твердых бытовых отходов (ТБО), относятся тепло и массоперенос, растворение и диффузия. Движущей силой теплопереноса является разность температур, при этом температура оказывает большое влияние на весь спектр процессов, протекающих на полигоне ТБО. Воздействие температуры в значительной степени определяет характер протекания химико-биологических процессов и влияет на состояние системы в целом. В связи с этим разработана задача теплопроводности в массиве ТБО с использованием метода конечных элементов, включающего в себя дифференциальную и вариационную постановки задачи теплопроводности на полигоне ТБО. Решена задача теплопроводности с использованием метода конечных элементов. Для расчета температурных полей разработан пакет программ «Work», предназначенный для определения стационарных и нестационарных температурных полей в плоских областях. В пакете реализован стандартный метод конечных элементов (МКЭ), применяемый для решения различных задач теплопроводности.

Ключевые слова: твёрдые бытовые отходы (ТБО), АСУТП, полигон ТБО

SOLUTION OF THE CONTACT HEAT CONDUCTION PROBLEMS FOR SOLID WASTE LANDFILLS

Sereda T.G.

State National Research Politechnical University of Perm, Perm, e-mail: iums@dom.raid.ru

The physical processes occurring in the array of municipal solid waste (MSW) are heat and mass transfer, dissolution and diffusion. The driving force is the temperature difference between the heat transfer, the temperature has a great influence on the whole spectrum of processes occurring at the landfill. Influence of temperature largely determines the character of the chemical and biological processes and affect the state of the VET system as a whole. In this regard, developed heat conduction problem in an array of MSW using the finite element method, includes a differential and variation formulation of the problem of heat conduction at the landfill. The problem of thermal conductivity using the finite element method. For the calculation of the temperature fields developed software package «Work», designed to determine the stationary and non-stationary temperature fields in flat areas. The package with the standard finite element method (FEM) is used to solve various problems of heat conduction.

Keywords: municipal solid waste (MSW), ASUTP, sanitary landfill municipal solid waste

Математическое моделирование в экологии приобретает все большее значение, что может принести существенные результаты в области моделирования макродлительных экспериментов, прогнозирования и синтезе свойств исследуемой системы. В работе рассматривается моделирование тепловых полей на полигоне захоронения ТБО [5]. Температура является определяющим фактором, влияющим на химические и биологические процессы, протекающие в теле полигона [1, 2].

Целью представленной работы являлось моделирование процессов теплопереноса на полигонах ТБО.

Материал и методы исследования

При обосновании методов теплопереноса использовался метод конечных элементов, методы математического и имитационного моделирования. Объектом исследований являлись тепловые потоки, протекающие на объектах утилизации отходов, рассматриваемые как объекты моделирования и управ-

ления. Материалом исследования являлись твёрдые бытовые отходы.

Результаты исследования и их обсуждение

Дифференциальная постановка задачи. Процесс теплопереноса на полигоне ТБО задан в области Ω в R^3 с границей S , $\bar{\Omega} = \Omega \cup S$, $S = S_i \cup S_k$, на части границы S_i заданы граничные условия 1-го рода (изолированный экран), на части S_k заданы граничные условия 3-го рода (конвективный теплообмен) (рис. 1) [8, 9].

Уравнение теплопроводности в сплошной среде имеет следующий вид [2]:

$$K_{xx} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + Q = 0, \quad (1)$$

где t – температура; K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – коэффициенты теплопроводности в направлениях x , y , z ; Q – внутренний источник тепла, при граничном условии

$$K_{xx} \frac{\partial t}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial t}{\partial y} l_y + K_{zz} \frac{\partial t}{\partial z} l_z + h(t - t_{oc}) - q = 0, \quad (2)$$

где h – коэффициент теплообмена, кВт/м²; t – температура на границе; t_{oc} – температура окружающей среды; q – точечный источник тепла.

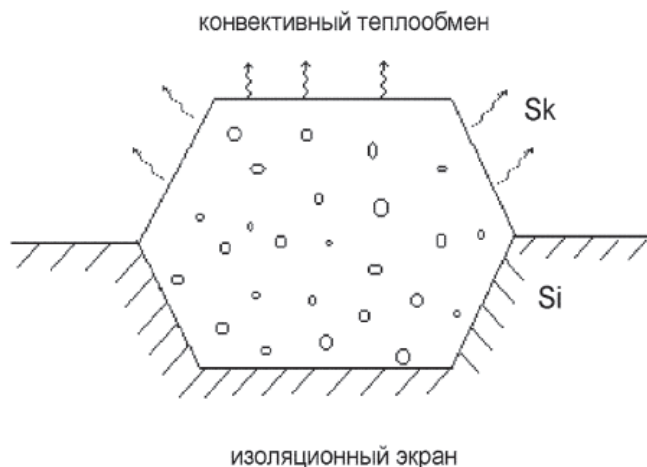


Рис. 1. Сечение полигона с граничными условиями 1-го и 3-го рода

Для нахождения приближенного решения дифференциальной задачи (1), (2) с помощью таких численных методов, как метод Рунге, Бубнова – Галеркина, конечных элементов (МКЭ), требуется построение

вариационных аналогов исходных дифференциальных задач.

Вариационная постановка задачи. Вариационный аналог будет представлен минимизацией следующего функционала:

$$\chi = \int_V \left[\frac{K_{xx}}{2} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 + \frac{K_{yy}}{2} \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)^2 \right] dV + \int_S \left[qt + \frac{1}{2} h(t - t_{oc}) \right] dS. \quad (3)$$

Для минимизации функционала на множестве узловых значений с различными характеристиками материала объемный интеграл должен быть представлен в виде

суммы интегралов, каждый из которых вычисляется по отдельному элементу. Матрица теплопроводности элемента имеет следующий вид [12, 3]:

$$[k^e] = \int_V [B]^T [D][B] dV + \int_S h [N]^T [N] dS. \quad (4)$$

В качестве дискретного элемента для разбивки используем треугольный элемент. Функция формы для линейного треугольного элемента имеет вид

$$N_\beta = \frac{1}{2A} (a_\beta + b_\beta x + c_\beta y), \beta = i, j, k. \quad (5)$$

$$t = [N_i N_j N_k] \begin{Bmatrix} t_i \\ t_j \\ t_k \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

Матрица градиентов $[B]$:

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Матрица свойств материала $[D]$:

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Теперь объемный интеграл примет следующий вид:

$$\int_V [B]^T [D][B] dV = \int_V \frac{1}{4A^2} \begin{bmatrix} b_i & c_i \\ b_j & c_j \\ b_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} dV. \quad (9)$$

Предполагая толщину элемента единичной, заменим dV на dA . Подынтегральное выражение в (9) постоянно и может быть вынесено за знак интеграла:

$$\int_V [B]^T [D][B]dV = [B]^T [D][B] \int_A dA = A [B]^T [D][B]. \quad (10)$$

Вычисляя произведение матриц, имеем

$$[k^{(e)}] = \frac{K_{xx}}{4A} \begin{bmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_k \\ b_j b_i & b_j b_j & b_j b_k \\ b_k b_i & b_k b_j & b_k b_k \end{bmatrix} + \frac{K_{yy}}{4A} \begin{bmatrix} c_i c_i & c_i c_j & c_i c_k \\ c_j c_i & c_j c_j & c_j c_k \\ c_k c_i & c_k c_j & c_k c_k \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Второй интеграл должен быть вычислен по поверхности:

$$\int_S h [N]^T [N] dS.$$

Подставляя в матрицу $[N]$ функции формы и выполняя матричное умножение, получаем

$$\int_S h [N]^T [N] dS = h \int_S \begin{bmatrix} N_i N_i & N_i N_j & N_i N_k \\ N_j N_i & N_j N_j & N_j N_k \\ N_k N_i & N_k N_j & N_k N_k \end{bmatrix} dS. \quad (12)$$

Программная реализация

Для расчета температурных полей разработан пакет программ «Work», предназначенный для определения стационарных и нестационарных температурных полей в плоских областях [4, 6, 7]. В пакете реализован стандартный метод конечных элементов (МКЭ), применяемый для решения различных задач теплопроводности. Функционально пакет разделен на две отдельные части: Grid – для

разбивки рабочей области на конечные элементы; Vega – для решения плоской задачи теплопроводности. Рассмотрим основные этапы работы с программой «Work».

Расчет теплофизических свойств фракций отходов

Для определения коэффициентов теплоемкости и теплопроводности использованы источники [11, 13] (таблица).

Теплофизические свойства фракций отходов

Компонент	Теплопроводность, кал/(см·с·град)	Теплоемкость, ккал/ кг
Бумага	144–308·10 ⁻⁶	3390
Пищевые отходы	130·10 ⁻⁶	890
Дерево	120·10 ⁻⁶	3410
Металл	0,136	49
Стекло	400–470·10 ⁻⁶	23
Резина	500·10 ⁻⁶	5670
Камни	2629·10 ⁻⁶	23
Текстиль	95–120·10 ⁻⁶	3460

Разбивка рабочей области на конечные элементы

Для разбивки рабочей области на конечные элементы (КЭ) необходимо предварительно разделить ее на зоны, каждая из которых образована восемью опорными узлами. Данную операцию можно провести либо вручную, либо с использованием специальных утилит для автоматического задания координат и номеров опорных уз-

лов. До разбивки следует выполнить эскиз исследуемой области, выбрать необходимое число зон, опорных узлов, занумеровать зоны и узлы, нумерация сторон в каждой зоне ведется против хода часовой стрелки. Информация по разбивке формируется в файлах «Work» с расширениями in1, in2, in3. Далее запускается модуль «Maingrid». Происходит формирование файла граничных условий. Для формирования файла запускается программа «Vc_trm». Исходные

данные для «Vc_frm» собирают в текстовом файле «Work.ggg». Расчет температурных полей создается в файле «Work.reg».

Для построения диаграммы температурных полей рис. 2 использована программа AXUM 5.0.

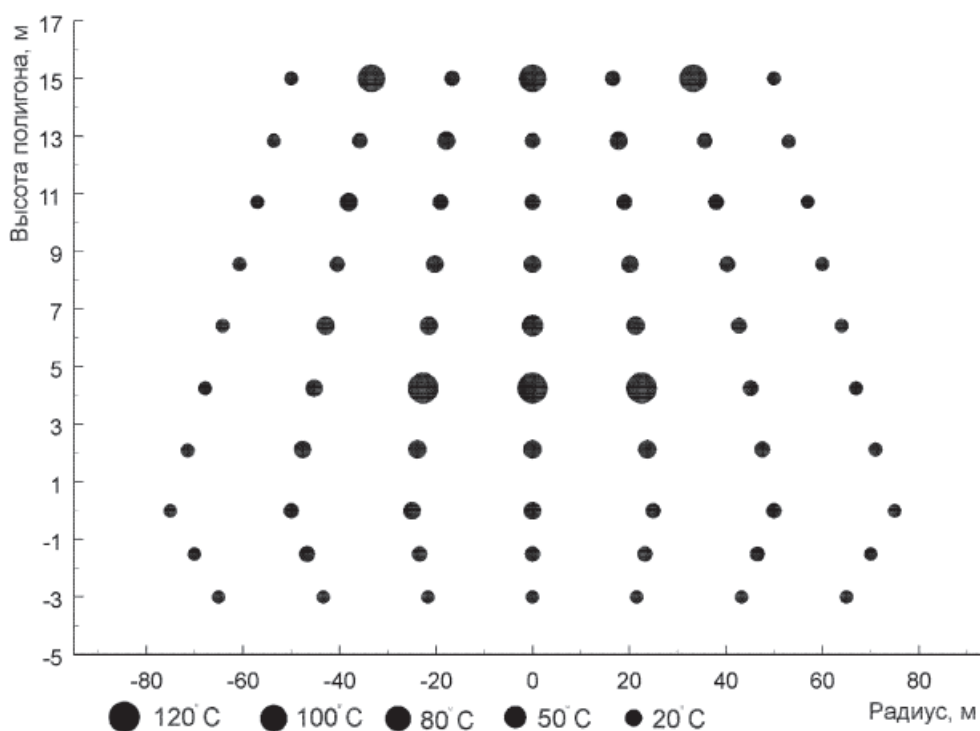


Рис. 2. Распределение температурных полей по сечению полигона

Применение методов системного анализа и кибернетики в управлении системами ПТО открывает возможность исследования и организации безопасного функционирования объекта депонирования ТБО в условиях, когда информация последовательно накапливается и реализуется в виде алгоритмов для ЭВМ. В этом случае управляющие действия будут направлены на минимизацию жизненного цикла природно-технических систем утилизации отходов, что имеет важное значение [14]. Внедрение автоматизированного рабочего места конструктора-проектировщика полигона ТБО уже на этапе проектирования позволит ускорить выполнение проектной документации и повысить безопасность эксплуатации природно-технической системы депонирования отходов на этапах её эксплуатации и рекультивации [8, 10, 15].

Список литературы

1. Артемов Н.И. [и др.] Технологии автоматизированного управления полигоном твердых бытовых отходов / Н.И. Артемов, Т.Г. Серда, С.Н. Костарев, О.Б. Низамутдинов // Международный журнал экспериментального образования. – 2010. – № 11. – С. 43.

2. Костарев С.Н., Серда Т.Г., Михайлова М.А. Системный анализ управления отходами. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012.

3. Костарев С.Н. Математическая модель управления состоянием полигона твердых бытовых отходов : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18. – Пермь, 2003. – 199 с.

4. Костарев С.Н., Серда Т.Г., Михайлова М.А. Программно-аппаратный комплекс управления качеством фильтрационных стоков // Экологические системы и приборы. – 2014. – № 3. – С. 39–46.

5. Костарев С.Н., Серда Т.Г., Михайлова М.А. Разработка автоматизированной системы мониторинга и управления природно-техническими системами утилизации отходов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6–2. – С. 273–277.

6. Костарев С.Н., Серда Т.Г. Комплексное внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами на санитарных полигонах твердых бытовых отходов // Экологические системы и приборы. – 2014. – № 4. – С. 20–28.

7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2009612494. – М.: ФИПС, 2009.

8. Серда Т.Г. [и др.] Снижение пожаровзрывоопасности объектов депонирования отходов // Пожарная безопасность. – 2008. – № 3. – С. 84–89.

9. Серда Т.Г. Обоснование технологических режимов функционирования искусственных экосистем хранения отходов: дис. ... д-ра техн. наук : 03.00.16; МГУП. – М., 2006.

10. Серда Т.Г., Костарев С.Н. Разработка методов проектирования автоматизированных систем обработки информации и управления искусственными экосистемами

хранения отходов // Экологические системы и приборы. – 2006. – № 11. – С. 21–24.

11. Серeda Т.Г. Источники загрязнения и методы защиты человека в техносфере: учеб. пособие для студентов вузов. – Пермь, Изд-во «ПНИПУ», 2012.

12. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 390 с.

13. Таблицы физических величин: справочник / под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

14. Kostarev S.N., Sereda T.G. Automated process control of sanitary municipal solid waste landfill // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Т. 22. – № SPL.ISSUE2. – С. 64–69.

15. Sereda T.G., Kostarev S.N., Elancheva E.N. Study safety environmental protection landfills using models anaerobic digesters // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 339–345.

References

1. Artemov N.I., Sereda T.G., Kostarev S.N., Nizamutdinov O.B. Tehnologii avtomatizirovannogo upravlenija poligonom tverdyh bytovyh othodov – Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimentalnogo obrazovanija, 2010, no. 11, pp. 43.

2. Kostarev S.N., Sereda T.G., Mihajlova M.A. Sistemnyj analiz upravlenija othodami. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. ISBN 978-3-8465-8298-5.

3. Kostarev S.N. Matematicheskaja model' upravlenija sostojaniem poligona tverdyh bytovyh jekosistem hranenija othodov: dis. ... dokt. tehn. nauk: 03.00.16; MGUP. M., 2006.

4. Kostarev S.N., Sereda T.G., Mihajlova M.A. Programmno-apparatnyj kompleks upravlenija kachestvom fil'tracionnyh stokov // Jekologicheskie sistemy i pribory. 2014. no. 3. pp. 39–46.

5. Kostarev S.N., Sereda T.G., Mihajlova M.A. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy monitoringa i upravlenija prirodno-tehnicheskimi sistemami utilizacii othodov // Fundamental'nye issledovanija. 2013. no. 6–2. pp. 273–277.

6. Kostarev S.N., Sereda T.G. Kompleksnoe vnedrenie avtomatizirovannyh sistem upravlenija tehnologicheskimi procesami na sanitarnyh poligonah tverdyh bytovyh othodov // Jekologicheskie sistemy i pribory. 2014. no. 4. pp. 20–28.

7. Svidetelstvo o registracii programmy dlja JeVM 2009612494. M.: FIPS, 2009.

8. Sereda T.G. [i dr.]. Snizhenie požarovzryvoopasnosti obektov deponirovanija othodov // Pozharnaja bezopasnost'. 2008. no. 3. pp. 84–89.

9. Sereda T.G. Obosnovanie tehnologicheskix rezhimov funkcionirovanija iskusstvennyh Sereda T.G. [i dr.]. Snizhenie požarovzryvoopasnosti obektov deponirovanija othodov // Pozharnaja bezopasnost'. 2008. no. 3. pp. 84–89.

10. Sereda T.G., Kostarev S.N. Razrabotka metodov proektirovanija avtomatizirovannyh sistem obrabotki informacii i upravlenija iskusstvennymi jekosistemami hranenija othodov – Jekologicheskie sistemy i pribory. 2006, no. 4, pp. 21–24.

11. Sereda T.G. Istochniki zagrjaznenija i metody zashhity cheloveka v tehnosfere: Ucheb. posobie dlja studentov vuzov. – Perm', Izd-vo «PNIPIU», 2012.

12. Segerlind L. Primenenie metoda konechnyh jelementov: Per. s angl. M.: Mir, 1979.

13. Tablicy fizicheskix velichin: Spravochnik / Pod red. I.K. Kikoina. M.: Atomizdat, 1976.

14. Kostarev S.N., Sereda T.G. Automated process control of sanitary municipal solid waste landfill // World Applied Sciences Journal. 2013. T. 22. no. SPL.ISSUE2. pp. 64–69.

15. Sereda T.G., Kostarev S.N., Elancheva E.N. Study safety environmental protection landfills using models anaerobic digesters // Applied Mechanics and Materials Vol. 682 (2014). pp. 339–345.

Рецензенты:

Козлов В.В., д.т.н., профессор кафедры ВМКСиС, Пермский военный институт внутренних войск МВД России, г. Пермь;

Костарев С.Н., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Строительное производство и материаловедение», Пермская государственная сельскохозяйственная академия, г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 19.12.2014.