

УДК 528.4 (075.8)

**ТЕРМОДИНАМИКА ТЕХНОГЕННОГО МАССИВА ТВЕРДЫХ  
БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

Доктор техн. наук

С.С. Нуркеев

Канд. техн. наук

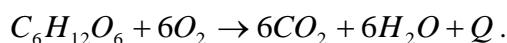
Ж.М. Жаппарова

А.К. Казбекова

*В данной статье рассмотрена термодинамика техногенного массива твердых бытовых отходов (ТБО).*

Термодинамическая система «техногенный массив ТБО – окружающая среда» является замкнутой в отношении массопереноса и изолированной в отношении энергопереноса и включает в себя три основные подсистемы: аэробную зону техногенного массива, анаэробную зону техногенного массива и прилегающий грунт.

Аэробная зона массива является источником тепловой энергии за счёт процессов саморазогрева, возникающих в результате биохимических реакций. Первоначально в поверхностном слое, вновь поступивших отходов (глубиной до 1,5...2 м), идёт распад органических веществ в результате процессов жизнедеятельности аэробных бактерий с использованием кислорода воздуха. Этот биохимический процесс является экзотермической реакцией и может быть упрощённо представлен термохимическим уравнением:



По мере истощения запасов кислорода в пустотах складированных ТБО начинают преобладать анаэробные микроорганизмы, которые не используют молекулярный кислород воздуха для окисления органических веществ. Анаэробный процесс, проходящий в нижележащих слоях, часто сопровождается снижением температуры, однако верхние слои служат теплоотдатчиком, тепло- и светоизоляцией нижних слоёв. Для крупных полигонов ТБО характерна повышенная температура в аэробной зоне – 60...80 °С (до 90 °С), в анаэробной зоне – 35...50 °С (до 60 °С).

К основным теплофизическим характеристикам техногенного массива ТБО относятся: теплоёмкость, теплопроводность, высшая и низшая теплота сгорания ТБО. Пространственная средняя или макроскопическая теплопроводность антропогенного новообразования зависит от состава,

структуры и свойств массива. Большее содержание органических составляющих в техногенном массиве обуславливает увеличение теплоёмкости по сравнению с почвами и грунтами.

Средняя удельная массовая теплоёмкость массива  $C_{ТБО}$  определяется, исходя из массовых долей  $n$   $i$ -х компонентов массива  $\omega_i$  и теплоёмкости этих компонентов  $C_i$ :

$$C_{ТБО} = \omega_1 C_1 + \omega_2 C_2 + \dots + \omega_i C_i + \dots + \omega_n C_n = \sum \omega_i C_i, \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}.$$

Средняя удельная объёмная теплоёмкость  $C'_{ТБО}$  массива определяется, исходя из объёмных долей  $n$   $i$ -х компонентов смеси  $r_i$  и теплоёмкости этих компонентов  $C'_i$ :

$$C'_{ТБО} = r_1 C'_1 + r_2 C'_2 + \dots + r_i C'_i + \dots + r_n C'_n = \sum r_i C'_i, \text{ кДж/м}^3\cdot\text{К}.$$

В номенклатуре составляющих ТБО наиболее теплоёмким компонентом является вода: чем влажнее пористая среда, тем большее количество теплоты требуется для изменения её температуры. Удельная теплоёмкость линейно зависит от влажности и может быть определена по формуле, выведенной на эмпирической основе и подтверждённой рядом авторов [1, 2, 3]:

$$C_{ТБО} = (0,033\dots 0,04) W + (0,88\dots 1,62), \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}.$$

Коэффициент пространственной средней (макроскопической) теплопроводности  $\lambda_{ТБО}$  зависит от состава и свойств массива, от размера, формы и пространственного расположения элементарных частиц и может быть определён, исходя из объёмных долей  $r_i$  и коэффициентов теплопроводности  $\lambda_i$  компонентов ТБО:

$$\lambda_{ТБО} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{\lambda_i}}, \text{ Вт/м}\cdot\text{К}.$$

Теплопроводность техногенного массива увеличивается с увеличением влажности: замена контакта твёрдых частиц на контакт с более теплопроводной жидкостью увеличивает молекулярный поток теплоты и интегральную теплопроводность системы. Увеличение влажности по-разному влияет на среду в зависимости от содержания органических компонентов. Зависимость теплопроводности от влажности почвы, согласно А.Ф. Чудновскому и другим авторам [1, 2, 3] подчиняется закону насыщения. Эта зависимость достаточно хорошо проявляется для минеральных почв лёгкого и среднего гранулометрического состава и совершенно не выдерживается на торфяных почвах. Увеличение содержания органических составляющих уменьшает теплоёмкость среды и сглаживает рас-

смаатриваемую зависимость, что подтверждается рядом экспериментальных данных:

$$\lambda = (0,0003...0,0005)W + (0,199...0,203), \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

Коэффициент температуропроводности или термодиффузии  $a$  показывает скорость прогревания или охлаждения техногенного массива и определяется по известной формуле:

$$a = \frac{\lambda_{ТБО}}{c'_{ТБО}} = \frac{\lambda_{ТБО}}{\rho_{ТБО} \cdot c_{ТБО}}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Ниже на рисунке представлена зависимость термодиффузии, теплопроводности и теплоемкости от влажности техногенного массива.

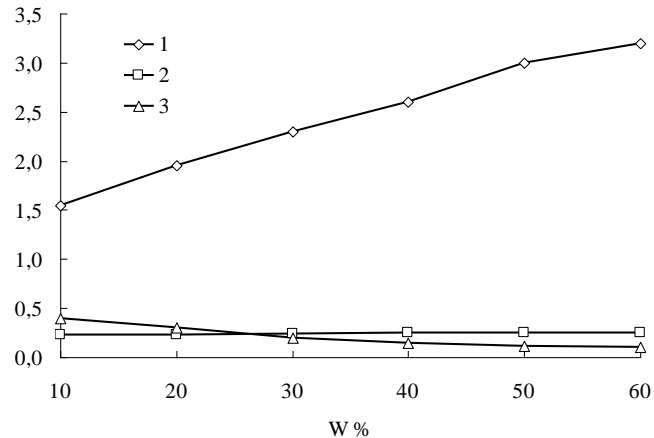


Рис. Зависимость различных параметров техногенного массива от его влажности. 1 – от термодиффузии,  $\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; 2 – от теплопроводности, Вт/м·К; 3 – от теплоёмкости, кДж/кг·К

При увеличении влажности увеличивается конвективная составляющая теплопереноса, что уменьшает скорость изменения температуры, так как большее количество теплоты переносится далее по потоку. Температуропроводность является немонотонной функцией влажности и изменяется по закону максимума [1, 3], в диапазоне основных значений действующей влажности зависимость может быть аппроксимирована полиномом второй степени:

$$a = (0,0001...0,0002)W^2 - (0,013...0,017)W + (0,454...0,512), \text{ м}^2/\text{с}.$$

Анализ зависимости термодиффузии от влажности для различных сред показывает, что немонотонность данной функции уменьшается с увеличением органической составляющей.

Дополнительным энергоисточником системы могут служить возникающие на полигоне ТБО пожары. Наложение данных по составу горючих элементов ТБО на треугольник топливного состава по Таннеру показало, что около 70 % проб ТБО могут гореть без привлечения внешнего энергоносителя. Теплотворная способность ТБО (низшая теплота сгорания) определена по известной формуле Д.И. Менделеева:

$$Q_p = 81C_p + 300H_p - 26(O_p - S_{pl}) - 6(9H_p + W_p),$$

где  $C_p$ ,  $H_p$ ,  $O_p$ ,  $S_{pl}$ ,  $W_p$  – пенсия в рабочей массе топлива углерода, водорода, кислорода, летучей серы и влаги в % (по массе) и составляет порядка 7000...9000 кДж/кг.

Многие реальные неравновесные и необратимые процессы энергетического взаимодействия могут быть с достаточной точностью описаны равновесными моделями для обратимых процессов [4]. Все процессы исследуемой системы, включая предмет термодинамического исследования – формирование температурного поля, развиваются со значительным масштабом координат времени и малым относительным изменением параметров состояния. Чем медленнее развиваются процессы, и чем меньше относительные изменения параметров, тем полнее процессы удовлетворяют представлению о равновесии и обратимости.

В системе «техногенный массив ТБО – окружающая среда» существует локальное равновесие в элементарных объёмах, например, в микропорах. Моделирование тепловых явлений предполагает разложение системы на элементарные объёмы, процессы в которых можно считать равновесными и обратимыми. Тогда при решении нашей задачи применительно к этим элементарным объёмам будут действенны методы анализа классической термодинамики и модель равновесных процессов. Все количественные соотношения теоретически обоснованной модели разработаны с учётом неравновесности и необратимости.

Уравнение первого начала термодинамики для системы «техногенный массив ТБО – окружающая среда» и для всех входящих в неё подсистем в дифференциальной форме имеет вид:

$$dQ = dU + dL,$$

где  $dQ$  – приведённая теплота, учитывающая неравновесность и необратимость;  $dU$  – изменение внутренней энергии;  $dL$  – работа.

Полагая исследуемую систему замкнутой и изолированной, рассмотрим энергетические связи подсистем. Основной целью изучения являются тепловые потоки и температурное поле системы, механической

энергией в данной задаче допустимо пренебречь. Учёт работы, преобразующейся за счёт необратимости и неравновесности в теплоту внутреннего теплообмена и приводящей к диссипации энергии, произведём следующим образом:

$$dQ = dQ' + dQ'',$$

где  $dQ'$  – обратимая подведённая или отведённая теплота;  $dQ''$  – необратимая теплота внутреннего теплообмена.

Аналитическое выражение второго начала термодинамики для исследуемой системы записывается в виде неравенства:

$$dS \geq dQ/T,$$

где  $S$  – полная энтропия системы;  $Q$  – количество теплоты, подводимое от теплоотдатчика.

Приращение энтропии возникает за счёт внешнего теплоисточника и внутренней диссипации энергии. Рассмотрим изменение энтропии подсистем, которая может увеличиваться, уменьшаться или оставаться постоянной в случае равновесного состояния. Энтропия аэробной зоны техногенного массива, которая является теплоотдатчиком с температурой  $T_1$ , уменьшается на  $(Q' - Q_1'')/T_1$ . Анаэробная зона массива и прилегающий грунт являются теплоприёмником с температурой  $T_2 < T_1$ , энтропия которого увеличивается на  $(Q' + Q_2'')/T_2$ . Определение изменения полной энтропии, исходя из принципа аддитивности, позволяет записать для исследуемой системы закон возрастания энтропии:

$$\begin{aligned} (Q' + Q_2'')/T_2 - (Q' - Q_1'')/T_1 &= Q'/T_2 + Q_2''/T_2 - Q'/T_1 + Q_1''/T_1 = \\ &= Q'(T_1 - T_2)/T_1 T_2 + Q_2''/T_2 + Q_1''/T_1 > 0. \end{aligned}$$

Энергетический баланс системы «техногенный массив ТБО – окружающая среда» позволяет количественно определить поток теплоты, приводящий к изменению температурного поля и включает следующие составляющие:

$$Q_T = Q_R + Q_{нж} + Q_p + Q_{атм} + Q_{пов} + Q_{вл},$$

где  $Q_T$  – затраты теплоты на изменение температурного поля;  $Q_R$  – теплота солнечной радиации;  $Q_{нж}$  – теплота самопроизвольного возгорания ТБО;  $Q_p$  – теплота биохимических реакций;  $Q_{атм}$  – теплообмен с приземным слоем атмосферы;  $Q_{пов}$  – затраты энергии на процессы на поверхности массива;  $Q_{вл}$  – затраты теплоты на суммарное испарение влаги.

Моделирование процессов теплопереноса в исследуемой системе осуществляется посредством дифференциальных уравнений сплошности, движения и энергии [3, 5, 6]. Рассмотрим элементарный неподвижный

объём техногенного массива или грунта, через который фильтруются техногенные воды. Определим скорость накопления внутренней энергии в элементарном объёме  $\Delta x \Delta y \Delta z$ .

Скорость подвода теплоты от внешнего источника:

$$\Delta y \Delta z (q_x/x - q_x/(x+\Delta x)) + \Delta x \Delta z (q_y/y - q_y/(y+\Delta y)) + \Delta x \Delta y (q_z/z - q_z/(z+\Delta z)),$$

где  $x, y, z$  – пространственные координаты;  $q_x, q_y, q_z$  – компоненты вектора плотности теплового потока  $q$ .

Разделив все члены полученного выражения на  $\Delta x \Delta y \Delta z$  и перейдя к пределу при  $\Delta x, \Delta y$  и  $\Delta z$ , стремящихся к нулю, в результате получим  $(\partial q_x/\partial x + \partial q_y/\partial y + \partial q_z/\partial z)$  или, переходя к характеристикам векторного поля, в компактном векторном виде – оператор Гамильтона.

Основными способами теплопереноса в системе являются теплопроводность и конвекция, что позволяет определять количество подведённой к элементарному объёму теплоты следующим образом:

$$q = q_{mnp} + q_m,$$

где  $q_{mnp}$  – количество теплоты, подводимое посредством теплопроводности:

$$q_{mnp} = -\lambda \nabla T,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $q_m$  – количество теплоты, подводимое в результате конвекции:

$$q_m = -\rho \omega i = -\rho \omega C \nabla T,$$

где  $\rho$  – плотность фильтрата;  $\omega$  – локальная скорость перемещения фильтрата;  $i$  – энтальпия фильтрата.

Кроме внешнего подвода теплоты на энергетическое состояние элементарного объёма, влияют процессы, происходящие внутри объекта исследования. В результате противодействия поверхностным нагрузкам и движению фильтрата внутри элементарного объёма возникают напряжения, система выполняет механическую работу, часть которой трансформируется в необратимые потери в виде теплоты или изменения внутренней энергии.

Рассмотрим скорость необратимого превращения данного вида работы во внутреннюю энергию, происходящего за счёт перемещения фильтрата относительно неподвижной структуры. Данную скорость возможно определить как произведение  $\mu \Phi$ , где  $\mu$  – коэффициент внутреннего динамического трения;  $\Phi$  – диссипативная функция необратимых потерь. Диссипативная функция выражается через градиенты скоростей перемещения фильтрата:

$$\Phi = 2[(\partial \omega_x/\partial x)^2 + (\partial \omega_y/\partial y)^2 + (\partial \omega_z/\partial z)^2] + [\partial \omega_y/\partial x + \partial \omega_x/\partial y]^2 + [\partial \omega_z/\partial y + \partial \omega_y/\partial z]^2 + [\partial \omega_x/\partial z + \partial \omega_z/\partial x]^2 - \frac{2}{3}[\partial \omega_x/\partial x + \partial \omega_y/\partial y + \partial \omega_z/\partial z]^2.$$

В некоторых случаях теплопереноса энергоисточник может иметь место внутри элементарного исследуемого объёма, что определяет его отдельный учёт –  $q_{\text{вн}}$ . Внутренним источником или стоком дополнительного тепла могут служить такие явления, как смачивание первоначально сухой среды, конденсация водяных паров или испарение, разложение органического вещества. При определении температурного поля аэробной зоны мощным внутренним теплоисточником являются экзотермические реакции. Определение данного теплового потока возможно провести, исходя из экспериментальных данных по объёму разложения биомассы.

Таким образом, обобщая все способы поступления в элементарный объём тепла, получим полное *уравнением тепловой энергии* в виде субстанциональной производной внутренней энергии:

$$\rho \cdot Du/Dt = - (\nabla q) + \mu \Phi + q_{\text{вн}},$$

где  $\rho$  – плотность техногенного массива;  $u$  – удельная внутренняя энергия;  $t$  – время.

Используя зависимость внутренней энергии от изменения температуры  $u = c\Delta T$ , получим возможность определения температурного поля системы:

$$\rho c \cdot DT/Dt = - (\nabla q) + \mu \Phi + q_{\text{вн}}.$$

Предложенный теоретический подход требуется развить в направлении практического решения задач исследования. Необходимо изучить особенности теплопереноса в аэробной зоне, определить кинетические константы биохимических реакций для расчёта количества выделяемой теплоты. Рассмотреть дополнительные внутренние теплоисточники в виде испарения внутри массива. Изучить необратимые процессы системы с целью детализации диссипативной функции. Определить зависимость теплофизических характеристик от плотности и температуры массива, от содержания органического вещества.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А.Д. Основы физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 244 с.
2. Куртнер Д.А., Усков И.Б. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищённом грунте. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 231 с.
3. Чудновский А.Ф. Теплофизика почв. – М.: Наука, 1976. – 352 с.
4. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 160 с.
5. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.

6. Юдаев Б.Н. Теплопередача. – М.: Наука, 1981. – 319 с.

КазНТУ им. К.И. Сатпаева, г. Алматы

### **ТҚҚ ТЕХНОГЕНДІ МАССИВТІҢ ТЕРМОДИНАМИКАСЫ**

Техн. ғылым. докторы	С.С. Нуркеев
Техн. ғылымд. канд.	Ж.М. Жаппарова
	А.Қ. Қазбекова

*Бұл мақалада тұрмыс қатты қалдықтардың техногенді массивтің термодинамикасы қарастырылған.*