



Данный программный продукт был испытан и внедрен в информационную систему предприятия ООО «Квадрат» как модуль поддержки принятия решений руководителя при планировании и управлении стоимостью изделия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.
2. *Лучко О.Н., Маренко В.А.* Нечеткая логика в управлении компонентами маркетинга // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 7. – С. 6-58.
3. *Шопин А.Г.* Оценка достоверности параметров технологических процессов на основе анализа нечетких величин // Изв. Самарского НЦ РАН. – 2002. – Т. 4, № 1. – С. 178-184.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии С.В. Шалобановым.*

*E-mail:*

*Маренко В.А. – marenko@ofim.oscsbras.ru.*

УДК 004.4

© 2010 г. **А.А. Новожилов**

(Сибирский государственный технологический университет, Красноярск)

## МЕТОД ДЕА ДЛЯ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

В работе приводится модель обращения отходов в отрасли по переработке твердых бытовых отходов. Рассматривается методика оценки сортирующих предприятий на основе методологии ДЕА. Приведенная методика позволяет выявлять объекты, показатель эффективности которых значительно ниже нормы, и давать рекомендации по повышению этого показателя за счет снижения затрат при постоянном выходе.

**Ключевые слова.** Переработка отходов, анализ среды функционирования, моделирование отрасли переработки, твердые бытовые отходы.

### Введение

С развитием технико-экономического прогресса и увеличением популяции населения в мире стал наблюдаться экологический кризис роста промышленных и бытовых отходов [1]. Для решения этой проблемы начали разрабатываться технологии по переработки различных видов отходов, создаваться перерабатывающие предприятия, производственные и экономические системы по организации сбора, доставки, переработке и использования (реализации) данного вида сырья.

Как известно, основная проблема переработки мусора — разделение его на фракции (бумага, дерево, металл, пластик, органика, резина, стекло). В России эта

проблема остается камнем преткновения: по мнению специалистов, дело не в несовершенстве технологий и даже не в нехватке средств, а в отсутствии продуманной системы и инфраструктуры отрасли, соотношения целей и средств их достижения, разумной организации дела на всех уровнях [2].

Ситуация в городе Красноярске имеет схожие черты, развитие перерабатывающей сферы, по мнению авторов, находится в зачаточном состоянии и нуждается в организации. Возникла необходимость в динамическом анализе, оптимизации и повышении эффективности системы утилизации отходов.

Произвести оценку перерабатывающих предприятий, в частности сортирующих заводов и комбинатов, как ключевых производств безопасной ликвидации отходов, можно, если использовать определенную методику. В качестве наиболее подходящей была выбрана методология DEA (в русских источниках АСФ – анализ среды функционирования). Эта методика позволяет, используя непараметрический анализ, оценить объекты по входам и выходам, не прибегая к анализу его структуры.

### **Теоретический анализ**

Объектом исследования является процесс обращения с твердыми бытовыми отходами, которые также называются «вторичными ресурсами». Вторичные ресурсы – материальные накопления сырья, веществ, материалов и продукции, образованные во всех видах производства и потребления, которые не могут быть использованы по прямому назначению, но потенциально пригодны для повторного применения в народном хозяйстве для получения сырья, изделий и/или электроэнергии [3].

Отходы – это остатки или дополнительные продукты, образующиеся в процессе или по завершении определенной деятельности и не используемые в непосредственной связи с этой деятельностью [3]. Качественный состав служит причиной их переработки. Не акцентируя внимания на промышленных отходах, утилизацией которых должны заниматься сами предприятия, так как отходы определяются их спецификой и содержат большинство легко выделяемых материалов, затронем городские бытовые отходы. В них содержатся такие полезные вещества как дерево, металлы, картон и бумага, дерево, стекло. Даже полимеры (такие как пластики, резина), наравне с ветошью и синтезированными материалами, могут быть повторно использованы с помощью современных технологий. Пищевые и органические остатки превращают в удобрения и плодородные слои земли за счет технологии компостирования. Утилизацию в перерабатывающей отрасли можно назвать процессом приведения (преобразования) путем физического, химического, биологического вмешательства в состав и структуру выделенного из отходов (разделенного) материала. Данному процессу предшествует сортировка отходов.

Сортировка отходов – разделение (смешение) согласно определенным критериям на качественно различающиеся составляющие [3].

Таким образом, выделяются четыре стадии для построения системы комплексной переработки твердых бытовых отходов города: уровень образования

(хранения) твердых бытовых отходов (ТБО), уровень сортировки, уровень подготовки к использованию, уровень использования. В источниках сырья (офисы, дома и микрорайоны, ранее образованные свалки, полигоны), жителями и работниками офисов производится первоначальное разделение отходов на типы: металлизированные и пластиковые, полимерно-ветошные и кожевенные, бумажные. Из централизованных мест приема средства спецавтопарка доставляют отходы на сортировочные заводы (станции). Здесь их разделяют по группам однородного состава для упрощения дальнейшей обработки. Случайные включения веществ, образовавшиеся в результате случайного (специального) попадания, не относящиеся к типу данной технологии или мешающие дальнейшей сортировке, отправляются на другие сортирующие станции. Разбитые на отдельные группы вещества в результате процесса сортировки могут поступать в экономический оборот как сырье или на утилизирующие предприятия, которые приспособливают данные вещества к использованию. После подготовки переработанное сырье приобретает форму, пригодную для использования в производстве других товаров, подобно «чистым», добываемым из недр. Это сырье и материалы поступают в производственные цехи заводов, занимающихся специализированным обращением таких материалов или использующие их наравне с обычными [4].

На основании построения структуры перерабатывающей отрасли необходимо учесть объемные потоки твердых бытовых отходов от источника образования до выпуска вторичного, пригодного к использованию продукта (материала или энергии). Это позволит применить методологию DEA для оценки эффективности функционирования существующих сортирующих комбинатов.

### Модель сырьевых потоков

Представление о движении и трансформации сырья дает уравнение баланса для поступающих и давно созданных скоплений отходов:

$$V_i(t) = V_i(t-1) + \Delta V_i(t) - \Delta V_{li}(t); \quad (1)$$

$$V_i(t) \geq 0; \quad (2)$$

где  $V_i(t)$  – количество отходов  $i$ -го типа к концу года  $t$ ;  $V_i(t-1)$  – количество отходов за прошлый период (прошлый год);  $\Delta V_i(t)$  – количество отходов, образованное в  $t$ -м году;  $\Delta V_{li}(t)$  – переработанное количество  $i$ -го типа отходов в  $t$ -м году;  $i = 1, \dots, n$  – тип перерабатываемого отхода, а также номер сортирующего комбината;  $t$  – номер года (периода).

Объемы отходов за прошлый период:

$$\Delta V_i(t) = \Delta V_{Pi}(t) + \Delta V_{CCi}(t) + \Delta V_{HCi}(t) + \sum_{r=1}^R M_{ir}(t), \quad (3)$$

где  $\Delta V_{Pi}(t)$  – объем отходов за  $t$ -й год на специально организованных полигонах, с определенным процентом сортировки (переработки);  $\Delta V_{CCi}(t)$  – объем отходов за  $t$ -й год на санкционированных, оборудованных или организованных свалках;  $\Delta V_{HCi}(t)$  – выявленный инспектированием объем отходов на несанкционирован-

ных, стихийных свалках за  $t$ -й год;  $M_{ir}(t)$  – объем, производимый  $r$ -м районом (источником образования отходов) в  $t$ -й год;  $r = 1, \dots, R$  – район города (локализованный источник накопления).

При условии внедрения перерабатывающей системы для твердых бытовых отходов величина  $V_i(t)$  постепенно должна сокращаться за счет утилизирующих предприятий. На сортирующих предприятиях тип отхода  $i$ , собранного с мест накопления, разделяется на виды (компоненты, материалы)  $p$ . Тогда переработанное количество  $i$ -го типа:

$$\Delta V_{li}(t) \leq V_{1\max}(t), \quad (4)$$

$$V_{1\max}(t) = \sum_{p=1}^{P_i} C_{ip}, \quad (5)$$

где  $V_{1\max}(t)$  – максимальное количество отходов, которое может принять и утилизировать соответствующий комбинат;  $C_{ip}$  – производительность завода  $p$ -й технологии утилизации  $p$ -го вида сырья (тонн/год);  $P_i$  – количество заводов для утилизации каждого компонента (вида) получаемого при достижимой на сегодняшний день степени качества сортировки  $i$ -го типа отходов;  $p = 1, \dots, P_i$  – номер источника утилизации отходов, определяющий технологию переработки вида из  $i$ -го типа отходов.

Уточнение объемной модели переработки будет осуществляться с определением локализации предприятий отрасли относительно районов города.

### **Модель оценки предприятий, участвующих в переработке и утилизации отходов**

Построим оценочную модель предприятий уровня сортировки. Для построения оценочной модели нескольких объектов переработки воспользуемся анализом матриц входных и выходных параметров. Входные параметры: объемы отходов, которые нужно рассортировать, энергия, затрачиваемая на сортировку. Выходные величины: рассортированные отходы в виде, пригодном для дальнейшей подготовки их к использованию.

Рассмотрим построение оценочных моделей сортирующих предприятий (заводов), которые расположены как в одной местности, так и распределены по разным городам страны. Выборка по регионам позволяет проследить уровень эффективности отраслей переработки в целом.

Чтобы найти объекты из выборки, в которых есть возможность сократить расходы (электроэнергия, человеческий ресурс, горючие материалы) на сортировку отходов, возьмем за основу входо-ориентированную (input-orienting) модель DEA [5]:

$$\begin{aligned} \min_{\theta, \lambda} & (\theta), \\ & -y_k + Y\lambda \geq 0, \\ & \theta x_k - X\lambda \geq 0, \\ & \lambda \geq 0. \end{aligned} \quad (6)$$

В модели мера эффективности  $u$  определяется по вектору  $l$ , характеризующему эталонные объекты, а также наборами входов и выходов.  $X$  – матрица входов состоит из  $x1$  и  $x2$ -столбцов, для каждого сортирующего объекта (строк), где  $x1$  – сырье в виде отходов, подаваемое на сортирующий завод;  $x2$  – энергия, необходимая для сортировки единицы объема.  $Y$  – матрица выходов содержит столбцы  $y1, y2, y3, y4$ , соответствующие разделенным веществам, с металлическими включениями, стеклянными, целлюлозосодержащими, компостными компонентами. Строим для каждого рассматриваемого объекта согласно модели DEA и количеству входов и выходов систему неравенств. Для  $j$ -го объекта системы модель будет выглядеть, следующим образом:

$$\begin{aligned} & \min_{\theta, \lambda} (\theta), \\ & - y1_j + (y2_1 \lambda_1 + \dots + y2_k \lambda_k + \dots + y2_N \lambda_N) \geq 0, \\ & - y2_j + (y2_1 \lambda_1 + \dots + y2_k \lambda_k + \dots + y2_N \lambda_N) \geq 0, \\ & - y3_j + (y3_1 \lambda_1 + \dots + y3_k \lambda_k + \dots + y3_N \lambda_N) \geq 0, \\ & - y4_j + (y4_1 \lambda_1 + \dots + y4_k \lambda_k + \dots + y4_N \lambda_N) \geq 0, \\ & \vartheta \cdot x1_j + (x1_1 \lambda_1 + \dots + x1_k \lambda_k + \dots + x1_N \lambda_N) \geq 0, \\ & \vartheta \cdot x2_j + (x2_1 \lambda_1 + \dots + x2_k \lambda_k + \dots + x2_N \lambda_N) \geq 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $k = \overline{1, N}$  – номер сортирующего объекта в выборке;  $j = \overline{1, N}$  – номер текущего оцениваемого объекта, для которого находится  $u$ , составляются неравенства и матрицы;  $N$  – количество объектов в выборке;  $x1_k$  – первый вход  $k$ -го объекта, характеризующий сортируемые отходы в виде смеси слабо разделенных материалов;  $x2_k$  – второй вход  $k$ -го объекта, характеризующий энергию, затрачиваемую на сортировку единицы объема отходов;  $y1_k, y2_k, y3_k, y4_k$  – выходы  $k$ -го объекта, характеризующие разделенные для этапа утилизации материалы – металл, стекло, целлюлозную и компостную субстанции соответственно.

Аналогично  $x1_j, x2_j, y1_j, y2_j, y3_j, y4_j$  – для текущего оцениваемого объекта.

Для остальных объектов будет меняться первый член каждого уравнения слева, соответствующий входам и выходам анализируемого объекта, тем самым пройдя  $N$ -е количество итераций. После определения неравенств в каждой итерации строим вспомогательные матрицы и векторы для решений задачи в матричной форме вида:  $Az \geq B$ .

Матрица и векторы для  $A, B$  и  $z$  будут выглядеть:

$$A = \begin{bmatrix} -y1_j & y1_1 & \dots & y1_k & \dots & y1_N \\ -y2_j & y2_1 & \dots & y2_k & \dots & y1_N \\ -y3_j & y3_1 & \dots & y3_k & \dots & y1_N \\ -y4_j & y4_1 & \dots & y4_k & \dots & y1_N \\ x1_j & x1_1 & \dots & x1_k & \dots & x1_N \\ x2_j & x2_1 & \dots & x2_k & \dots & x2_N \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$B^T = (-1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad 0 \quad 0), \quad (9)$$

$$z^T = (0 \quad \lambda_1 \quad \dots \quad \lambda_N). \quad (10)$$

По составленным матрицам и векторам находим симплекс-методом  $u$  и  $l$ . Найденное  $u$  – показатель меры эффективности объекта относительно самого эффективного объекта выборки определяет меру производственной эффективности сортирующего предприятия. Таким же образом от составления неравенств до определения  $u$  и  $l$  производится оценка  $k$ -го из  $N$  объектов.

После определения всех  $u$  появляется возможность дать конкретному сортирующему регионально распределенному заводу из данной выборки рекомендации по уменьшению затрачиваемой энергии для сортировки отходов, при получении такого же количества полезных веществ (металл, стекло, картон, компостная смесь), которые поступят на дальнейшую подготовку к использованию (рецикл).

Согласно методу АСФ объекты переработки сравниваются между собой, формируется набор эффективных объектов. Эффективность модели будет выше, если в выборку включать как можно больше объектов, – например, заводы из других регионов.

### Заключение

Рассмотренные в статье математические модели и методика предназначены для анализа перерабатывающих предприятий при оценке эффективности их взаимодействия. Позволяют осуществлять по исходным данным и модельным расчетам контроль объемов накопления переработанных и непереработанных отходов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Новожилов А.А. Необходимость глубокой переработки отходов в условиях Красноярского края // Вестник НИИ СУВПТ: Сб. науч. тр. – Красноярск. – 2007. – №25. – С. 27-33.
2. Елдышев Ю. Отходы: не зарывать, а перерабатывать. – М.: Экология и жизнь, 2003.
3. Тарасенко Е.А. Формирование экономико-организационного механизма повышения эффективности качества услуг по селективному сбору твердых бытовых отходов в городах: Автореф. ... дис. канд. экон. наук. – СПб: СПбГИЭУ, 2005.
4. Новожилов А.А. Система избыточной переработки отходов. ... – С. 155-160.
5. Farrell M.J. The Measurement of Productive Efficiency // Journal of The Royal Statistical Society. – 1957. – Vol. 120, Part III. – P.253-281.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым*

*E-mail:*

*Новожилов А. А. – masterspy@rambler.ru*