

# ЭКОНОМИКА

УДК 330.341:628.463

## ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗДЕЛЬНОГО СБОРА ТБО

**В.Б. Алексеенко, Н.Ю. Сопилко**

Кафедра инженерного бизнеса и управления предприятием  
Российский университет дружбы народов  
*Ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 117923*

**А.К. Балалаев**

НИИ биологии  
Днепропетровский национальный университет  
*пр. Гагарина, 72, Днепропетровск, Украина, 49010*

**С.М. Лисицкая**

Кафедра биотехнологии и безопасности жизнедеятельности  
Украинский химико-технологический университет  
*пр. Гагарина, 8, Днепропетровск, Украина, 49005*

Оптимизация процесса сбора ТБО путем снижения затрат, сортировки мусора с одновременным улучшением экологического состояния окружающей среды является одним из условий эффективного функционирования системы управления отходами. Предложена универсальная эффективная модель, позволяющая в условиях современного рынка использовать различные варианты исходных и ограничивающих параметров раздельного сбора ТБО.

**Ключевые слова:** раздельный сбор ТБО, система массового обслуживания, материальный поток, оптимизационная модель.

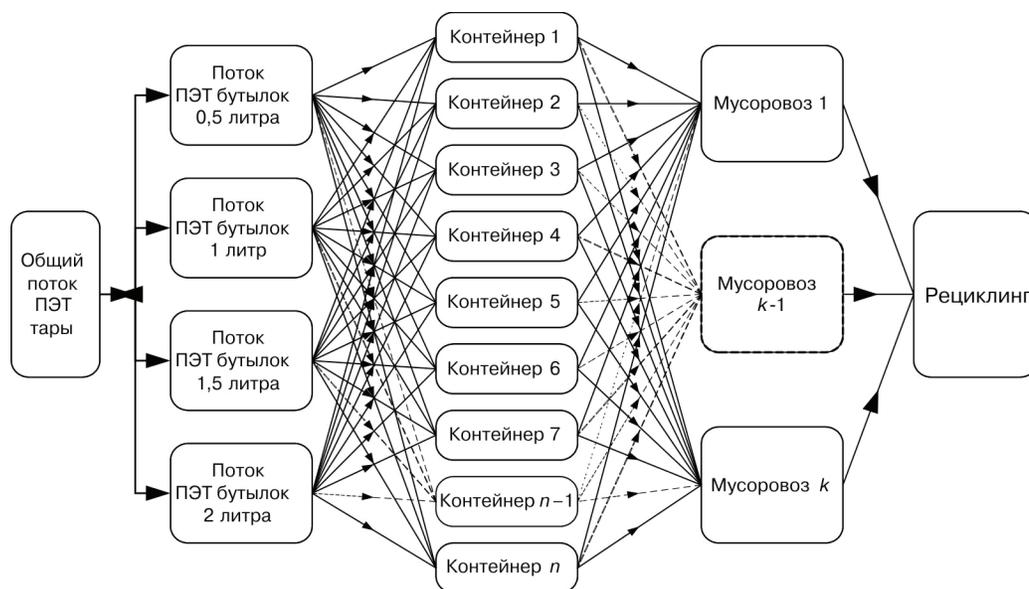
В большинстве развитых стран экологические вопросы защиты окружающей среды от мусора, который является источником всякого рода загрязнений, а часто и болезней среди населения, относятся к приоритетным. Эффективное обращение с отходами предполагает не только улучшение природных санитарно-гигиенических условий, но и обеспечение использования их в качестве вторичных материальных ресурсов как возможность получения дополнительной прибыли в хозяйственной деятельности.

Сфера обращения с отходами должна основываться на разработке направленных и сбалансированных вариантов их рециклинга. Для успешной работы в системе организации сбора и вывоза ТБО целесообразно развивать направления, сочетающие как оптимальное соотношение производственных затрат, так и минимизацию потерь в окружающую среду. Учитывая, что первоочередной и ответственной задачей многоступенчатого процесса управления отходами является организация их раздельного сбора (сортировка по разным контейнерам), перспективным признается ее дальнейшее развитие и совершенствование [1; 2].

В условиях современного рынка для оптимизации движения материальных потоков при сборе и вывозе ТБО ранее рассматривалась возможность модернизации контейнерного и автомобильного парка, вывоз сортированного мусора при использовании различных вариантов исходных и ограничивающих параметров [3].

Функционирование системы раздельного сбора ТБО можно наглядно представить с помощью имитационного моделирования на примере пластиковых бутылок (ЮЗАО г. Москвы), которые являются вторичным сырьем на рынке. Организация процесса сбора и вывоза использованных ПЭТ емкостей на пункты вторичной переработки рассматривается в виде системы массового обслуживания (СМО) (рис. 1).

За единицу модельного времени принимается 1 мин. Предполагается, что время одного цикла моделирования кратно 24 ч. Маршрут движения мусоровоза, а также время на обслуживание одного контейнера определялись по отчетным данным ЮЗАО Москвы для выборки 1000 транзактов (рис. 2), из которой видно, что наиболее вероятное время находится в диапазоне от 5 до 15 мин. [4].



**Рис. 1.** Блок-схема имитационной модели системы сбора и вывоза ПЭТ бутылок

*Источник:* составлено автором по [5; 6]

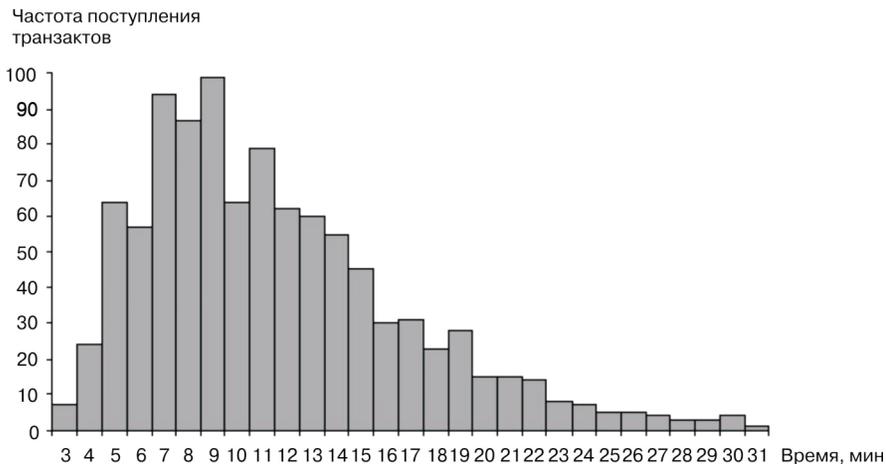


Рис. 2. Модельная гистограмма времени обслуживания контейнера

При построении модели проводилась оценка количества бутылок различного объема, накапливающихся в контейнере. От этой величины зависит период вывоза содержимого контейнера. Основная масса бутылок имеет цилиндрическую форму и может располагаться в контейнере произвольным образом, но наиболее вероятная позиция — горизонтальная, так как это положение наиболее устойчивое. На практике такое расположение маловероятно, поскольку в контейнер поступают бутылки разного диаметра и высоты и неизбежно присутствуют дополнительные пустоты возле стенок контейнера и между бутылками в горизонтальном ряду. Также в контейнер попадают бутылки в смятом состоянии и бутылки объемом менее 0,5 л, которые могут заполнять образующиеся ниши. Поэтому для упрощения расчетов принималось, что бутылка занимает в контейнере объем описывающего ее прямоугольного параллелепипеда. Моделирование проводилось для условного района на 100 тыс. жителей. Согласно действующим нормам население такого района производит 27,2 тыс. т в год ТБО, из них 1632 т — изделия из пластика (ПЭТ бутылки).

Результаты расчетов и другие исходные данные модели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры входных транзактов имитационной модели системы

| Емкость ПЭТ, л | Объем параллелепипеда, л | Отношение объемов | Средний вес ПЭТ, г | Отношение массы к занимаемому объему | Доля массы пластика, % | Количество ПЭТ, шт/мин | Закон распределения равномерный |
|----------------|--------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|
| 0,5            | 1,08                     | 2,16              | 25                 | 23,19                                | 7                      | 8,69                   | 0,11 ± 0,06                     |
| 1              | 1,86                     | 1,86              | 41,3               | 22,25                                | 5                      | 3,78                   | 0,26 ± 0,14                     |
| 1,5            | 2,67                     | 1,78              | 44,5               | 16,65                                | 69                     | 48,69                  | 0,02 ± 0,01                     |
| 2              | 3,3                      | 1,65              | 48                 | 14,55                                | 13                     | 8,41                   | 0,12 ± 0,07                     |

Согласно табл. 1 самая маленькая бутылка объемом 0,5 л является самой выгодной с точки зрения максимума веса заполненного контейнера. Таких бутылок

помещается в контейнере больше всего, и отношение массы к занимаемому объему у них максимально, но их доля в общем потоке ПЭТ бутылок составляет всего 7% или 8,69 шт/мин.

Кроме перечисленных параметров, в модели можно изменять емкость контейнера. Это не означает, что на практике нужно обязательно применять контейнеры разных типов с разными объемами, возможно использовать несколько контейнеров одного типа эквивалентных по объему в пределах одной контейнерной площадки. При этом используются контейнеры одного типа (1,1 м<sup>3</sup>), соответственно варианты емкости контейнеров кратны этой величине.

На базе построенной модели СМО можно исследовать ситуации вывоза контейнеров 1 раз в день, 1 раз в 2 дня и т.д. Также возможно изменять время работы мусоровозов (в нашем случае — 8 ч).

Дальнейшее исследование модели выявило обратно пропорциональную зависимость веса собранного за две недели вторсырья от потерь (табл. 2).

Таблица 2

**Варианты решений функционирования имитационной модели системы сбора и вывоза ПЭТ бутылок в районе на 100 тыс. жителей за две недели**

| Задаваемые переменные модели       |                                       |   |                             |                     | Выходные параметры                                |                      |               | Затраты за 1 год, тыс. руб. | Затраты за 10 лет, тыс. руб. |
|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------------|---------------------|---|----------------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|
| Емкость контейнера, м <sup>3</sup> | Количество контейнерных площадок, шт. | Полнота заполнения к вывозу, м <sup>3</sup> | Количество мусоровозов, шт. | Период вывоза, сут. | Количество обслуженных контейнерных площадок, шт. | Вес собранных ПЭТ, т | Потери ПЭТ, % |                             |                              |
| 1,1                                | 100                                   | 1,0   | 2                           | 1                   | 1 175   | 21,057               | 61,2          | 2 030                       | 9 723                        |
| 1,1                                | 100                                   | 1,0   | 3                           | 1                   | 1 755   | 31,287               | 43,9          | 2 395                       | 13 373                       |
| 1,1                                | 150                                   | 1,0   | 3                           | 1                   | 1 770   | 31,553               | 42,3          | 3 045                       | 14 584,5                     |
| 1,1                                | 150                                   | 1,0   | 4                           | 1                   | 2 337   | 41,359               | 26,2          | 3 410                       | 18 234,5                     |
| 1,1                                | 200                                   | 1,0   | 5                           | 1                   | 2 939   | 47,221               | 15,2          | 4 425                       | 23 096                       |
| 2,2                                | 100                                   | 2,0   | 2                           | 1                   | 1 137   | 41,043               | 26,8          | 3 330                       | 12 146                       |
| 2,2                                | 100                                   | 1,5   | 3                           | 1                   | 1 664   | 52,149               | 10,2          | 3 695                       | 15 796                       |
| 2,2                                | 160                                   | 1,1   | 4                           | 1                   | 2 254   | 56,621               | 0,85          | 5 620                       | 22 353,6                     |
| 3,3                                | 100                                   | 1,1   | 3                           | 1                   | 1 793   | 55,213               | 2,6           | 4 995                       | 18 219                       |
| 3,3                                | 200                                   | 1,1   | 5                           | 2                   | 1 466   | 48,769               | 6,7           | 8 712,5                     | 23 663                       |
| 2,2                                | 80                                    | 1,4   | 3                           | 1                   | 1 756   | 53,342               | 7,9           | 3 175                       | 14 826,8                     |
| 3,3                                | 200                                   | 0,8   | 2                           | 1                   | 2 887   | 56,817               | 0,1           | 9 990                       | 36 438                       |

\* Вариант модели с круглосуточной работой мусоровозов.

Согласно данным табл. 2 лучший весовой показатель у варианта 8 при потерях 0,85% и варианта 12 (потери — 0,1%). Однако вариант 8 предпочтительней, поскольку его эксплуатация обходится дешевле и нет необходимости в организации круглосуточного режима работы мусоровозов. Реализация варианта 1 требует минимальных затрат, но причиняет наибольший вред окружающей среде (потери 61,2%). При вычислении потерь учитывалось количество всех невывезенных бутылок независимо от их веса или объема (экологический и эстетический вред

приносит каждая бутылка, не попавшая во вторичную переработку). К экономически невыгодным вариантам по показателям за 10 лет эксплуатации можно отнести варианты 4, 5, 8, 10, 12. Минимальные затраты на эксплуатацию рассматриваемой системы приходятся на варианты 1, 2 и 6, но вариант решения 6 экологически предпочтительней, так как процент потерь у него в 2 раза ниже. К экономически и экологически обоснованным можно отнести вариант 11.

В динамике процесс накопления в контейнерах вывезенной ПЭТ тары и ПЭТ упаковки, не попавшей во вторичную переработку, представлен на рис. 3, 4.

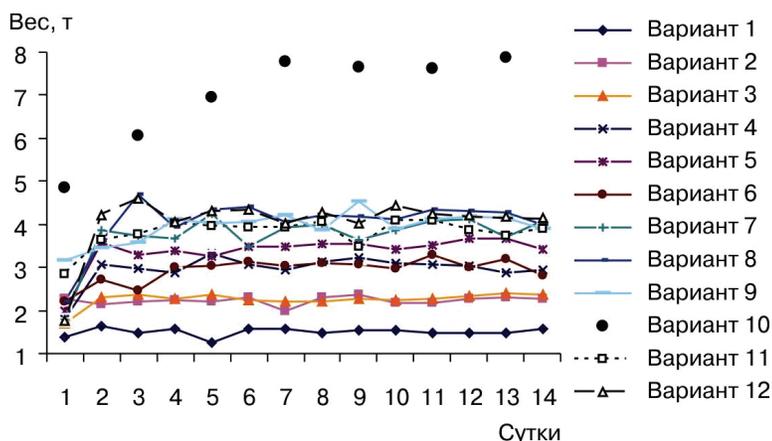


Рис. 3. Временные зависимости веса собранных ПЭТ бутылок в двенадцати вариантах функционирования модели

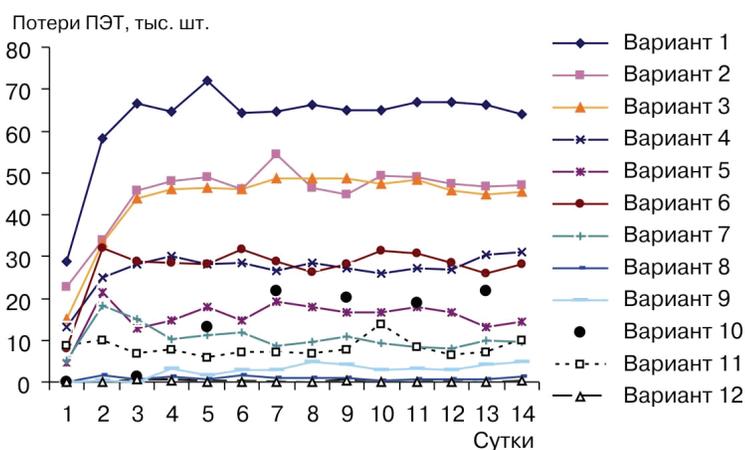
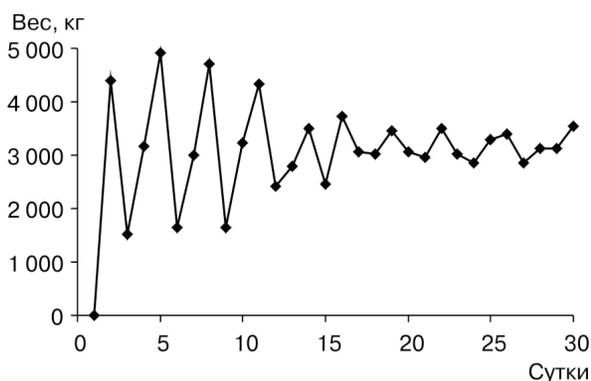


Рис. 4. Зависимости потерянных ПЭТ бутылок от времени в двенадцати модельных вариантах

Согласно рис. 3, 4 с момента пуска системы в эксплуатацию первые 4—7 дней во всех вариантах наблюдается переходный процесс, который характерен колебаниями уровней, далее происходит стабилизация показателей. Рассматриваемую систему, как и любую динамическую систему, можно перевести в колеба-

тельный режим (рис. 5), который показывает неудачный выбор задаваемых переменных, когда в один или несколько дней наблюдается высокий уровень сбора отходов пластика, а на следующий день или несколько дней — низкий и т.д.



**Рис. 5.** Пример неэффективного решения модели (колебательный режим с периодом 3 суток)

Предлагаемая модель является универсальной и эффективной за счет того, что дает возможность в выборе начальных условий и структуры СМО, а также использования результатов моделирования для решения практических задач на аналогичных реальных объектах.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что оптимальной, будет система с такой структурой и правилами, в которой достигается определенная синхронизация всех протекающих в ней процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Рогов Н.С.* Раздельный сбор отходов — задача каждого гражданина // Твердые бытовые отходы. — 2007. — № 5. — С. 26—28.
- [2] *Полупан А.А.* Обращение с отходами: от снижения затрат к получению прибыли // Твердые бытовые отходы. — 2007. — № 5. — С. 8—13.
- [3] *Балалаев А.К.* Эколого-экономический подход к оптимизации сбора и вывоза ТБО в мегаполисе на основе инновационного подхода / С.М. Лисицкая, Н.Ю. Сопилко // Вестник УГТУ-УПИ. Экономика и управление. — 2009. — № 4. — С. 53—59.
- [4] Отчетная информация по проблеме сбора мусора (ТБО) по микрорайонам ЮЗАО г. Москвы за 2008 г.
- [5] *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания. — М: Машиностроение, 1979.
- [6] *Кудрявцев Е.М.* GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. — М.: ДМК Пресс, 2004.

## **ECOLOGICAL-ECONOMIC BASIS APPLICATIONS OF SEPARATE SDW GATHERING**

**V.B. Alexeenko, N.U. Sopilko**

Peoples' Friendship University of Russia  
*Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 117923*

**A.K. Balalaev**

Dnipropetrovsk' National University  
*pr. Gagarina, 72, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010*

**S.M. Lisitskaya**

Ukrainian State University Chemistry and Technology  
*pr. Gagarina, 8, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49005*

Optimisation of SDW gathering process by decreasing expenses, sorting of waste with simultaneous improvement of an environmental state, is one of conditions of effective waste management system. The author offers the universal model allowing to use different variants of initial and limiting parameters of separate SDW gathering in the conditions of the modern market.

**Key words:** separate SDW gathering, mass service system, material flow, optimized model.