

# Подходы к математическому моделированию инфраструктуры раздельного сбора и утилизации вторичного сырья

Г. А. Куприянов<sup>1</sup>, Р. И. Сольнищев<sup>2</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);

Международный институт инжиниринга в экологии и безопасности человека

<sup>1</sup>science@help-in.ru, <sup>2</sup>remira70@mail.ru

**Аннотация.** В докладе рассмотрены основные подходы по построению математических моделей замкнутой системы раздельного сбора и утилизации твёрдых коммунальных и промышленных отходов. Предлагаются решения задачи автоматизации процессов данной системы.

**Ключевые слова:** экология; охрана природы; проектирование; моделирование

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одна из приоритетных задач природоохранной деятельности – обеспечение стопроцентного объёма экологически безопасных переработки или хранения твёрдых, жидких или газообразных бытовых отходов. Здесь рассмотрены подходы к математическому моделированию инфраструктуры раздельного сбора и утилизации отходов (ИРСУО) как вторичного сырья в рамках замкнутой системы управления «Природа-Техногеника» (ЗСУПТ) [1], с учётом проведённого в РФ Года Экологии и во исполнение норм природоохранного законодательства РФ, а также следуя иерархии обращения с отходами [3]. Моделирование технологических и логистических процессов и обновление (обучение) модели соответствуют первому этапу основного цикла использования САПР ИРСУО [2, 3], в основу которой лягут математические модели ИРСУО.

## II. ИРСУО КАК ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Физически ИРСУО как подсистема ЗСУПТ [1] входит в её замкнутый контур – подсистему рециклинга отходов, где она занимает место между потребителями готовой продукции и заготовителями вторичных ресурсов, связанных обратными связями через рынки и поставщиков вторичных ресурсов и их покупателей – изготовителей продукции и рынки её сбыта.

ИРСУО представляет собой сложный программно-аппаратный и логистический комплекс – систему «умных» контейнерных площадок, транспортных средств, автопарков, центров-складов временного хранения, сортировочных станций, приёмных терминалов заготовительных предприятий, диспетчерских центров и центров хранения и обработки данных.

Иными словами, ИРСУО – это соединённые в единую систему:

- СХР, система хранения ресурсов: «умные» хранилища, накопители. Это заглублённые контейнеры для раздельного сбора отходов и их группы, склады, терминалы, автоматы по приёму тары.
- АГТС, автоматизированная грузовая транспортная система (например, в качестве её реализации предложена инновационная транспортная система SkyWay [3]).
- ИСИБ, интегрированная система измерений и безопасности.
- СУЗП, система управления запасами и поставками.
- СГИС, специализированная геоинформационная система, визуализирующая сбор, перемещение и хранение вторичного сырья в реальном времени.
- ИССАД, информационная система сбора и анализа данных. Результаты её работы позволят совершенствовать модели и оптимизировать параметры ИРСУО.

## III. ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД

ИРСУО может быть представлена как линейная система автоматического управления (САУ) в рамках ЗСУПТ. Параметры, определяющие поведение САУ, детерминированы в данном подходе. Для простоты будем полагать, что ИРСУО работает в штатном режиме без внешних воздействий, приводящих к серьёзным нарушениям её работы: хранилища и транспортные средства всегда доступны, все измерительные системы постоянно работоспособны. Перечислим звенья САУ, их физический смысл и толкование их параметров.

Источниками перемещаемых с помощью средств АГТС порций фракций вторичного сырья являются накопители, которые могут быть представлены в виде идеальных интегрирующих звеньев, принимающих на своих входах величины массовых скоростей потоков фракций отходов.

Контролирующая “умные” накопители ИСИБ по достижении ими заданной степени заполнения (как по объёму, так и по массе) формирует сигналы, которые попадают в АГТС в виде заявок на включение их в маршрут обслуживания в процессе очередного рейса.

Движение транспортного средства от базы через последовательность размещений накопителей к целевому накопителю сопровождается запаздываниями. Представим совокупную массу вторичного сырья на выходе составного звена САУ для процесса сбора одним транспортным средством из  $N$  накопителей с последующей транспортировкой в накопитель следующего звена следующим рекуррентным соотношением:

$$\begin{cases} y_N(p) = \frac{v_N e^{-p\tau_N}}{1 + T_N p} \left( \frac{k_N}{p} x_N(p) + y_{N-1}(p) \right) \\ y_1(p) = \frac{v_1 e^{-p\tau_1}}{1 + T_1 p} \cdot \frac{k_1}{p} x_1(p) \end{cases} \quad (1)$$

Здесь параметры элементарных звеньев можно трактовать как постоянные интервалов времени между получениями порций фракции из очередного накопителя (в показателях экспонент), параметры его инерционности (в знаменателях дробей), приобретение массы вторичных ресурсов при селективном сборе или потери при погрузке (коэффициенты в числителях).

Для промежуточного или выходного хранилища текущая масса порции отдельно собранной фракции имеет вид:

$$Y(p) = \sum_{i=1}^M \frac{\Psi_i}{1 + T_i p} e^{-p\phi_i} \cdot y_{Ni}(p) \quad (2)$$

Совокупная масса фракции вторичного сырья на входе сортировочного или перерабатывающего предприятия:

$$u(p) = \sum_{j=1}^Q \frac{\xi_j}{1 + \Theta_j p} e^{-p\mu_j} \cdot Y_j(p) \quad (3)$$

Как видно, мы имеем дело с системой, которую после преобразований можно привести к виду

$$u(p) = \sum_{r=1}^R W_r(p) x_r(p) \quad (4)$$

В частности, исключив инерционные звенья, имеем:

$$u(p) = \sum_{r=1}^R \frac{\alpha_j}{p} e^{-p\beta_j} x_r(p) \quad (5)$$

Данная модель позволяет представить массу отдаваемого на переработку вторичного сырья заданной фракции как функцию времени.

Чтобы данная модель была пригодной для проектирования ИРСУО, далее необходимо в явном виде выделить в ней объёмы и прочие характеристики “умных” контейнеров, однако, в имитационном моделировании они уже могут в соответствии с ней быть подобраны эмпирически.

#### IV. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПОДХОДЫ

ИРСУО, как описанная выше САУ, эксплуатируется в стохастическом режиме: начальные условия и параметры звеньев могут быть представлены как случайные величины.

Также предполагается переход к стохастическим дифференциальным уравнениям, чтобы оценить возможность их применения для моделирования потоков вторичного сырья на разных стадиях сепарации и исследовать вероятностные характеристики ИРСУО.

ИРСУО может быть представлена как система массового обслуживания, структура и операционные характеристики которой могут отличаться в зависимости от географических и иных факторов.

Подробное рассмотрение вероятностных подходов выходит за рамки настоящего доклада.

#### V. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ

Существуют общедоступные ресурсы сети Интернет для получения данных о географии транспортных сетей (интерактивные карты и планы населённых пунктов, областей, государств), о размещении пунктов вторичного сырья (например, Greenpeace Recyclemap), о текущем положении транспортных средств. К примеру, карты общественного транспорта в реальном времени дают информацию о скоростях транспортных потоков в населённых пунктах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сольников Р.И., Коршунов Г.И. Системы управления «природо-техногеника». СПб.: Политехника, 2013. 205 с.
- [2] Куприянов Г.А., Сольников Р.И. Задачи проектирования и эксплуатации природоохранной инфраструктуры как единой сложной системы. // Тез. докл. на XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2018).
- [3] Куприянов Г.А., Сольников Р.И. Проектирование инфраструктуры раздельного сбора и утилизации вторичного сырья. // Тез. докл. на I Международной конференции «Управление муниципальными отходами как важный фактор устойчивого развития мегаполиса» (WASTE'2018)