



УДК 338 22.01 (075.8)

© А. М. Корнилов, К. Т. Пазюк, 2008

## **ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЦИКЛИНГА ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО МАТЕРИАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

*Корнилов А. М.* – канд. экон. наук, доц. кафедры «Экономика управления в отраслях химико-лесного комплекса»; *Пазюк К. Т.* – д-р филос. наук, проф. завкафедрой «Экономическая кибернетика» (ТОГУ)

В статье рассматриваются проблемы повышения эффективности вовлечения отходов в экономический оборот. Определены направления переработки твердых бытовых отходов. Разработана оптимизационная модель размещения пунктов переработки отходов и производства продукции из вторичного сырья на основе исследования рыночного спроса.

This article deals with the problem of increase of efficiency in use of waste in economics. The trends of solid domestic waste processing have been determined. The optimization model of location of waste processing stations and goods production out of secondary raw materials basing on market requirements research has been worked out.

*Ключевые слова:* бытовые отходы, отходы производства, рынок вторичных ресурсов, обращение отходов, рециклинг отходов, государственное регулирование, концентрация, спрос.

Проблемы охраны окружающей среды и сохранения природных ресурсов находятся в центре внимания мировой общественности. От успешного их разрешения зависит судьба человечества.

Одним из насущных экономических вопросов настоящего времени выступает вовлечение в хозяйственный оборот твердых бытовых отходов. Данная проблема связана с тем, что значительная часть твердых бытовых отходов является искусственно произведенными материалами, которые не могут быть самостоятельно превращены факторами природной среды в ее естественные компоненты. В то же время твер-

дые бытовые отходы являются неисчерпаемым источником вторичных материальных ресурсов, которые весьма эффективно заменяют природные ресурсы в процессе производства.

Сложность этой проблемы состоит в том, что разработка и производство новых материалов, а также изменение ассортимента потребляемой продукции опережают развитие технологий их вторичного использования или утилизации. Особенно это проявляется при утилизации твердых бытовых отходов на мусоросжигающих заводах, где из безобидных и нейтральных материалов могут образовываться высокотоксичные соединения.

Следует отметить, что низкий уровень вовлечения в хозяйственный оборот твердых бытовых отходов порожден не только технологическим развитием общества, но и сложившимися стереотипами культуры их обращения в быту относительно поздним осознанием необходимости управления ими, а также отсутствием квалифицированных специалистов.

Анализ имеющегося опыта развития переработки отходов позволяет сделать вывод, что каждый проект по рециклингу должен быть тщательно обоснован, проведен предварительный анализ рынка, поиск эффективных технологий. Как правило, добиваются положительных результатов те предприниматели, которые работают в тесном сотрудничестве с организациями, генерирующими отходы, занимающимися их сбором и вывозом, переработкой вторичных ресурсов, а также с администрациями муниципальных образований.

Несмотря на увеличение объемов вовлечения в хозяйственный оборот отходов по отдельным направлениям, в целом, уровень использования вторичных ресурсов в крае остается низким. Первоочередной проблемой, которая должна быть решена в крае и в муниципальных образованиях, остается повышение уровня вовлечения твердых бытовых отходов в хозяйственный оборот.

Существуют различные концепции переработки твердых бытовых отходов в урбанизированных поселениях.

Первая концепция предполагает в рамках крупного города ввод в эксплуатацию одной или нескольких сортировочно-перегрузочных станций. На сортировочных линиях производится разделение и сбор тех видов отходов, которые могут быть использованы в дальнейшем для переработки или продажи. На таких станциях могут быть организованы собственные перерабатывающие производства. В случае отсутствия последних предусматривается реализация собранных и подготовленных к продаже вторичных ресурсов.

Оставшаяся часть отходов прессуется, загружается в большегрузные специализированные автопоезда и вывозится на полигоны и свал-



ки, где размещается на хранение.

По сравнению с ныне существующими системами сбора и вывоза отходов в большинстве городских поселений России данная технология позволяет повысить уровень использования твердых бытовых отходов, снизить расходы на их транспортировку за счет более полной загрузки автопоездов.

Второе крупное направление в области переработки ТБО – мусоросжигание. Заводы, специализировавшиеся на этом виде деятельности, могут предусматривать предварительную сортировку твердых бытовых отходов, получая те же компоненты вторичного сырья, как на обычных сортировочно-перегрузочных станциях. Второй вариант исключает сортировку отходов: неразделенным потоком они направляются в мусоросжигающую установку. При кажущейся простоте такой вариант может оказаться дорогостоящим и экологически опасным. В результате сжигания выделяются опасные токсичные вещества, нейтрализация которых требует значительных затрат. Остаточные шлаки также содержат токсины и могут быть захоронены только в специально оборудованных местах размещения.

Отходы, полученные в результате разделения ТБО, а также заготовленные в организациях, могут подвергаться различным способам переработки.

Переработка вторичных ресурсов остается приоритетным направлением развития рециклинга отходов, хотя рост цен на углеводороды может изменить ситуацию, и некоторые уже разделенные отходы станут дополнительным источником для производства энергии.

Наиболее крупнотоннажным ресурсом остается макулатура, которая традиционно используется в производстве бумаги. Однако для того, чтобы она могла быть использована в качестве сырья в бумажном производстве, требуется дополнительная ее сортировка, выделение наиболее ценных ее фракций, пригодных для использования в технологических процессах. Таким требованиям отвечает только та макулатура, которая, как правило, заготавливается с учетом ее разделения на фракции по группам на стадии ее образования по четко сформулированным и контролируемым правилам в организациях. Разделение смешанного потока макулатуры, отсортированного из ТБО, из-за высоких трудозатрат оказывается экономически нецелесообразным. В таком виде (смешанном) макулатура остается ценным сырьем для перерабатывающих производств. Она может быть использована по ряду таких направлений:

- как изготовление плит мокрым способом (плиты используются для облицовки потолков, стен, изготовления перегородок жилых и производственных помещений, задних стенок мебели);

- производство теплоизоляционных материалов полусухим способом на минеральном связующем (материалы используются для теплоизоляции потолков, перегородок жилых, производственных, складских помещений);

- производство санитарно-гигиенической бумаги;
- производство кровельных материалов.

Макулатура может быть рассмотрена даже в качестве экспортного товара.

Следующий вид перспективных отходов – полимерные. Их количество и состав имеют тенденцию к увеличению. Разнообразие физико-химических свойств создает дополнительные трудности при организации их переработки. Во многих случаях требуется обязательное разделение отходов пластика по видам. В смешанном виде используется в качестве дополнительного источника энергии в доменных печах. Достоинство метода – отсутствие необходимости детоксикации и возможность использования хлорсодержащих пластиков. Большинство других способов переработки предполагает использование в качестве сырья термопластиков.

Модификация вторичного сырья с помощью лигнина. На основе модифицированного полимерного вторсырья производятся композиционные полимерные материалы, имеющие качественные характеристики, не уступающие исходному продукту.

Регенерация физическим рециклом термопластичных отходов. Полученный полуфабрикат используется для производства деталей конструкционного назначения в строительстве, для производства коврового волокна, деталей для автомобилестроения, упаковочных изделий, вспененных масс.

Производство древесно-полимерных плит (измельченные отходы древесины и термопластические отходы, включая одноразовые шприцы, отходы ламинированной бумаги для упаковки молока и сока, оплетку кабеля, полимерсодержащие отходы переработки макулатуры). Плиты используются для обшивки стен, потолков, перегородок жилых, производственных, складских помещений. Имеется опыт (США, Германии) использования бутылок емкостью более 1 л в качестве многооборотной тары (до 1000 оборотов).

В составе ТБО городских поселений содержится значительное количество древесных отходов, они увеличиваются по мере нарастания объемов реконструкции и ремонта помещений, смены мебели. К данному виду отходов относится обрезь деревьев, возникающая при уходе за насаждениями в поселениях. Часто древесные отходы попадают на несанкционированные свалки. Простейший способ переработки древесных отходов – получение технологической щепы. В сочетании с от-



ходами макулатуры и пластика она может быть использована в производстве плит.

В связи с обострившейся проблемой топливных материалов представляет интерес получение жидкого горючего газа методом пиролиза.

Особенно важным преимуществом создаваемых новых технологий является то обстоятельство, что пиролизные установки могут перерабатывать в топливные компоненты разнообразные виды отходов: резинотехнические, в том числе шины; древесные, в виде опилок, стружки, коры и т. п.; лигнин, отходы пластика; также возможно использование торфа, бурых углей и сапропеля.

В результате переработки может быть получен топочный мазут, газ, полукокс и другие полезные материалы в зависимости от исходного сырья. Авторы проектов утверждают, что выход топочного мазута может достигать до 500 кг с одной тонны отходов. Использование в дальнейшей технологической цепочке очистки от примесей и реактора синтеза может трансформировать газ в бензин марки АИ-80, легкое дизельное топливо, сжиженный пропанбутан и парафин.

В настоящее время имеется тенденция увеличения строительного мусора, который в настоящее время практически не перерабатывается. Основная масса строительного мусора возникает в результате сноса и реконструкции помещений и оказывается на санкционированных и не-санкционированных свалках. В то же время уже имеются технологии по переработке строительных отходов. Продукты дробления бетонного лома, прошедшие активацию в помольном агрегате, успешно используются в производстве ячеистого бетона.

Более простые технологии предусматривают дробление строительных отходов в щебень, который может быть использован по различным направлениям: в производстве строительных материалов, в дорожном строительстве.

Опыт переработки строительного мусора в развитых странах свидетельствует о том, что направление будет развиваться только при поддержке властных структур. В настоящее время в Москве уже применяются подобные подходы. Принято постановление, в соответствии с которым заключаются договоры на снос строений только с организациями, имеющими лицензию на переработку строительных отходов, а в проектной документации имеется соответствующий раздел.

Следующим видом вторичных ресурсов, который в последнее время утратил свои позиции, является стеклобой.

В настоящее время, как уже отмечалось, основное количество стеклобоя используется как добавка в шихту стекловаренных печей. При этом обеспечивается экономия шихтовых материалов, в том числе

кальцинированной соды, являющейся одним из важнейших компонентов шихты; количества топлива, так как расход тепла на варку стекла из стеклобоя меньше, чем из первичных материалов.

Из стеклобоя вырабатываются облицовочная стеклокерамическая плитка, которая отличается от обычной керамической плитки долговечностью, морозо- и атмосферостойчивостью; строительные и облицовочные кирпичи; бетон и изделия из него. Применение стеклобоя и отходов стекла при изготовлении бетонных изделий позволяет повысить их прочность, улучшить тепло- и звукоизоляционные свойства, внешний вид, снизить коэффициент температурного расширения.

В измельченном виде стеклобой используется в дорожном строительстве в качестве добавки в асфальтобетонные смеси. Тонко измельченные отходы стекла могут применяться также в качестве наполнителей пластмасс, резины, красок и других материалов. В композиции с полимерами стеклобой применяется для изготовления самых разнообразных формованных изделий, труб, стеновых панелей и т. п.

Следующее крупное направление, которое остается практически нереализованным – утилизация автошин.

Основные направления переработки и использования изношенных шин: производство регенерата, получение резиновой крошки для производства гидроизоляционных строительных и некоторых технических материалов; строительство дорог с усовершенствованным асфальто-резинобетонным покрытием; получение технического углерода и других продуктов методом пиролиза; сжигание в специальных установках для получения тепловой энергии; укрепление откосов, берегов морей и рек; создание искусственных рифов в морях, плавающих волнорезов, противоударных барьеров на дорогах и т. д.

Регенерация резины – одно из наиболее целесообразных направлений утилизации шин, поскольку в этом случае материалы, содержащиеся в резиновой части шин, используются с наибольшим эффектом. По данным научно-исследовательских организаций, в рецептуре резиновых изделий без ухудшения их качества можно заменить регенератом до 10 % исходной смеси. При этом одна тонна регенерата в зависимости от типа резиновой смеси позволяет экономить 400-550 кг синтетического каучука.

Разработана технология изготовления из регенерата объемной многооборотной тары для упаковки и транспортирования химических продуктов. Тара обладает высокой химической стойкостью и может эксплуатироваться при температуре от – 30 до +70°С. Применение такой тары позволяет экономить большие количества фанеры, дерева, металла и полиэтилена.

Большие перспективы имеют и другие направления использования



изношенных шин:

- производство водной дисперсии резины для тампонирования буровых скважин, добавки в литой асфальтобетон, создания подпочвенных водоудерживающих экранов, гидроизоляция фундаментов зданий и сооружений;

- изготовление плиточных полов животноводческих помещений на основе резиновой крошки;

- производство технического углерода методом пиролиза изношенных покрышек.

Особое значение придается разработке технологии производства резиновой пыли и применению ее в протекторных резиновых смесях для автомобильных шин.

Возможно также использование изношенных шин для производства тепловой энергии, так как по теплопроводной способности резина не уступает каменному углю.

Отечественной промышленностью за последние годы разработаны способы производства из изношенных шин ряда новых материалов и изделий различного народно-хозяйственного назначения:

- бризола, предназначенного для антикоррозийной защиты подземных металлических трубопроводов (применяется для строительства магистральных газопроводов);

- резино-битумной гидроизоляционной мастики, применяемой в сочетании с бризолом или без него для изоляции трубопроводов и некоторых других подземных сооружений;

- изола битумно-резинового – рулонного кровельного материала, превосходящего по свойствам традиционные материалы типа толя и рубероида;

- химических стойких бумажных мешков с прослойками из обрезиненной крафт-бумаги для упаковки агрессивных, гигроскопических и комкующихся при высыхании химикатов и удобрений;

- подрельсовых прокладок, предназначенных для амортизации динамических нагрузок и электроизоляции верхнего покрытия железобетонных путей, сооружаемых с применением железнодорожных шпал;

- водной дисперсии резины, пригодной для замены каучуковых латексов.

Актуальность постановки задачи связана с ростом большого объема транспортных средств в крае, а следовательно, и ростом изношенных шин. Возникает экологическая проблема их переработки или утилизации.

Для решения этой задачи необходим мониторинг источников сырья (шин) по территории края; местам возможной переработки; существующим технологиям переработки; и, наконец, по производимой

продукции, где используется вторсырьё, по ее объёмам (спросу) и потребителям.

Таким образом, активными элементами модели должны быть поставщики сырья (шин), переработчики сырья (предприятия малого бизнеса), потребители продукции с использованием вторсырья.

Возникает задача размещения пунктов переработки на территории края. Причем, в зависимости от степени локализации и концентрации источников возможны два варианта размещения.

*Вариант 1:* задача специализации и концентрации по месту переработки в одном районе края;

*Вариант 2:* задача размещения пунктов специализации и концентрации переработки по районам края.

Решения подобного рода задач размещения пунктов переработки в общем виде базируется на среднестатистических показателях объемов поставок сырья (шин) по районам, объемов спроса на продукцию из вторсырья, затрат на переработку и на показателях получаемого дохода. Однако в реальных ситуациях используемые параметры математической модели подвержены различным факторам воздействия, причем закономерность воздействия различных факторов риска имеет различный характер как для входных параметров (ресурсов), производственных параметров (объемов, затрат), так и для выходных параметров (объемов реализации и цен).

Причем этот характер может принимать вид как нормального, так и пуассоновского, и других распределений по годам.

А малый бизнес интересуется отдача на период кредита в несколько лет. Возникает задача оценки риска вложений в бизнес на период окупаемости  $T_{OK}$  или период кредита  $T_{КР}$ .

Таким образом, от статистической задачи размещения правомерен переход к динамической задаче размещения с изменением факторов воздействия на параметры оценки по годам и критериям принятия решения в условиях неопределенности.

В этой связи следует рассмотреть различные схемы моделирования поставленной задачи (на примере переработки шин).

### **СТАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ**

#### ***Исходные данные моделирования:***

$A_1, \dots, A_i, \dots, A_m$  – мощности (объемы поставок шин) по каждому  $i$ -му поставщику за плановый период (год), где  $i = \overline{1, m}$  – индекс поставщика;

$B_1, \dots, B_j, \dots, B_n$  – мощность переработки шин по  $j$ -му предприятию пере-





- работки;  $j = 1, n$  – индекс предприятия переработки.
- $\Pi_1, \dots, \Pi_k, \dots, \Pi_L$  – спрос на потребление  $k$ -го вида продукта с использованием вторичного сырья переработки шин;  $k = 1, L$  – индекс видов продуктов, используемых вторичное сырье.
- $C_{i,j}, k_{i,j}$  – удельные затраты на транспортировку и удельные капитальные вложения на доставку сырья из  $i$ -го источника в  $j$ -й пункт переработки;
- $V_{js}$  – мощность переработки сырья в  $j$ -м пункте по  $s$ -й технологии;
- $s = 1, S$  – индекс технологии;
- $\eta_s$  – коэффициент переработки шин по  $s$ -й технологии (коэффициент образования  $s$ -х вида вторсырья);
- $C_{js}$  – себестоимость переработки сырья в  $j$ -м пункте по  $s$ -й технологии;
- $k_{j,s}$  – удельное капиталовложения в переработку сырья в  $j$ -м пункте по  $s$ -й технологии;
- $C_k, K_k$  – удельные и капитальные затраты в производство  $k$ -го продукта;
- $\Pi_k$  – оптовая цена на реализацию  $k$ -го продукта;
- $Y_j$  – коэффициент назначения;
- $$Y_j = \begin{cases} 1 & \text{если реализуются } s - e \text{ варианты технологии} \\ & \text{в } j - m \text{ пункте переработки} \\ 0 & \text{нет} \end{cases}$$
- $$\sum_{j=1}^2 Y_j = 1;$$
- $\eta_s$  – коэффициент переработки шин по  $s$ -й технологии ( $кг/шина$ );
- $\eta_{sk}$  – коэффициент использования  $s$ -го полуфабриката в  $k$ -й продукции  $кг/ед. прод.$  ;
- $x_{ijs}$  – расчетный параметр объема доставки шин из  $i$ -го пункта поставки  $j$ -й пункт переработки по  $s$ -й технологии (шинах);
- $x_{jsk}$  – расчетный параметр объема  $s$ -го вторсырья в  $j$ -м пункте переработки, используемого в  $k$ -м продукте;
- $E$  – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности отрасли.

### Математическая модель задачи (вариант I)

Целевая функция

$$\Phi(V, \Pi, C) = \sum_j \sum_s \sum_k x_{j sk} \cdot \eta_{sk} \cdot y_{js} (\Pi_k - C_k - K_k \cdot E) -$$

$$- \sum_k \sum_j \sum_s x_{j sk} \cdot (C_{js} + K_{js} \cdot E) - \sum_i \sum_j \sum_s x_{ijs} \cdot (C_{ij} + K_{ij} \cdot E) \cdot \eta_s \rightarrow \max$$

**Модель I (вариант I)**

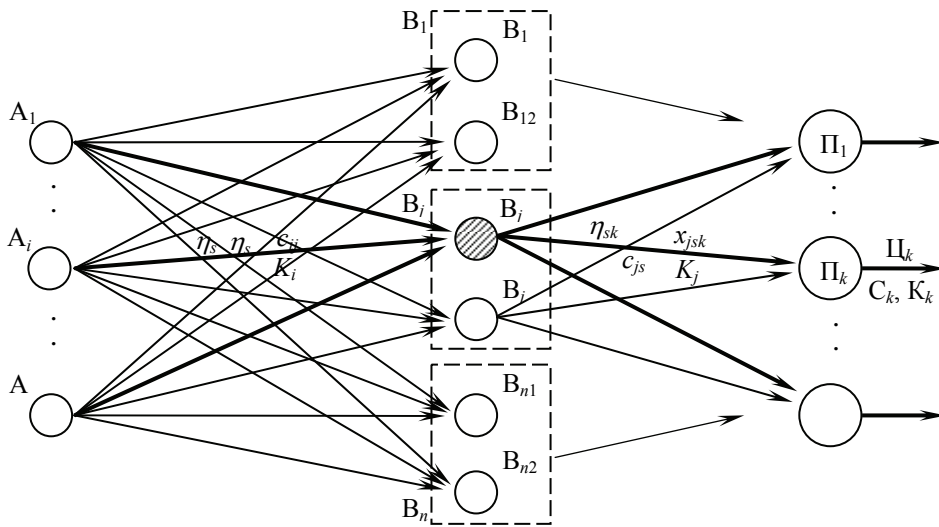


Рис. 1. Схема анализа переработки шин и использования вторсырья

**Ограничения**

- 1) по поставщикам:  $\sum_j \sum_s x_{ijs} \cdot \eta_s \leq A_i, \quad i = \overline{1, m}.$
- 2) по переработчикам:  $\sum_i x_{ijs} \leq B_{js}, \quad j = \overline{1, n}, \quad s = \overline{1, S};$   
 $\sum_k x_{j sk} \cdot Y_j \leq B_{js}, \quad s = \overline{1, S}, \quad j = \overline{1, n}, \quad \sum_j y_j = 1;$
- 3) по потребителям:  $\sum_j \sum_s x_{j sk} \cdot y_j = \Pi_k, \quad k = \overline{1, L},$   
 $x_{ijs} \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad s = \overline{1, S}; \quad x_{j sk} \geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad s = \overline{1, S}, \quad k = \overline{1, L}.$

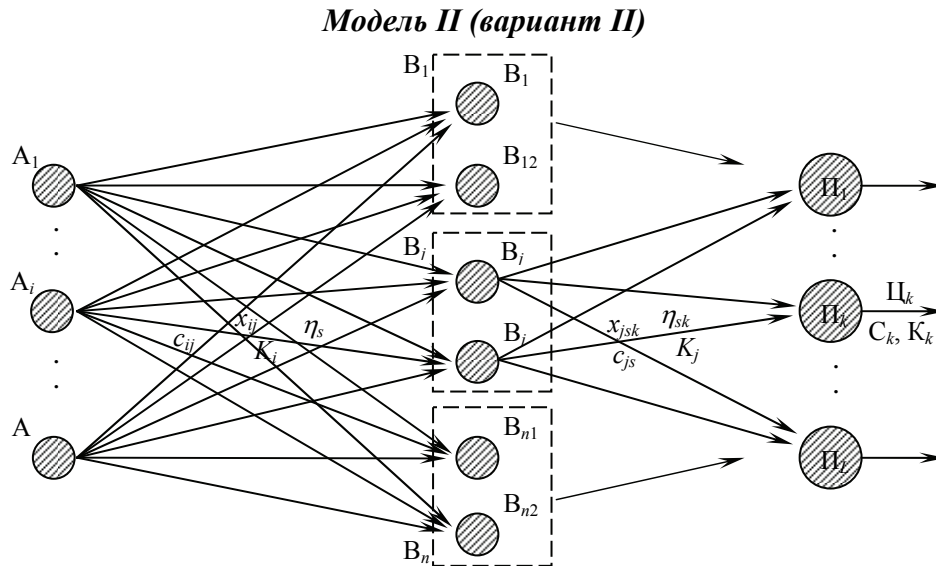


Рис. 2. Схема анализа переработки шин и использования вторсырья

### Математическая модель задачи

Целевая функция:

$$\Phi = (V, \Pi, C) = \sum_k \Pi_k \cdot (\Pi_k - C_k - K_k \cdot E) \cdot \eta_{sk} - \\ - \sum_j \sum_s \sum_k x_{jks} \cdot (C_{jks} + K_{jks} \cdot E) - \sum_i \sum_j \sum_s x_{ijs} \cdot \eta_s \cdot (C_{ij} + K_{ij} \cdot E) \rightarrow \max$$

Ограничения:

- 1) по поставщикам:  $\sum_j \sum_s x_{ijs} \leq A_i, \quad i = \overline{1, m};$
- 2) по переработчикам:  $\sum_i x_{ijs} \cdot \eta_s \leq B_{js}, \quad j = \overline{1, n}, \quad s = \overline{1, S};$   
 $\sum_k x_{jks} = B_{js}, \quad j = \overline{1, n}, \quad s = \overline{1, S};$
- 3) по потребителям:  $\sum_j \sum_s x_{jks} \cdot \eta_{sk} = \Pi_k, \quad k = \overline{1, L}.$

### Динамический подход к задаче моделирования

В соответствии с постановкой задачи схема анализа строится на сравнении расчетных параметров статической модели с динамической, учитывающей факторы риска в изменении параметров объема  $\tilde{V}$ , цены  $\tilde{C}$  и затрат  $\tilde{C}$ .

Для определения функции прибыли  $\Phi(\tilde{V}, \tilde{C}, \tilde{C})$  анализируются

факторы риска, влияющие на параметры  $V$ ,  $C$ ,  $S$  как переработчиков, так и потребителей. Факторы воздействия имеют неопределенный, случайный характер.

Решение подобной задачи возможно с использованием моделей теории игр. Для этого формируется матрица платежей  $\Phi = \|\Phi_{sk}(\tilde{V}, \tilde{C}, \tilde{C})\|$ , где  $\Phi_{sk}(\tilde{V}, \tilde{C}, \tilde{C})$  – доход, полученный производителем от использования  $s$ -й технологии ( $s = \overline{1,2}$ ) при производстве  $k$ -го вида продукции ( $k = \overline{1,4}$ ).

Переменные  $\tilde{V}, \tilde{C}, \tilde{C}$  характеризуют изменения соответственно объемов (спроса)  $\tilde{V}$ , цены  $\tilde{C}$  и затрат  $\tilde{C}$  под воздействием факторов риска.

При этом выполняются следующие условия расчета платежей:

- 1) если  $\tilde{V}_s \leq \tilde{V}_k$ , то  $\Phi_{sk}(\tilde{V}, \tilde{C}, \tilde{C}) = \tilde{V}_s \cdot (\tilde{C}_s - \tilde{C}_k)$
- 2) если  $\tilde{V}_s > \tilde{V}_k$ , то  $\Phi_{sk}(\tilde{V}, \tilde{C}, \tilde{C}) = \tilde{V}_k \cdot \tilde{C}_k - \tilde{V}_s \cdot \tilde{C}_s$

Вся проблема при этом состоит в выявлении факторов риска и степени их воздействия на параметры производителя  $V_s, C_s$  и потребителя  $V_k, C_k$ . Оценка варианта технологии  $S$  осуществляется по критерию  $\Phi_s : \Phi_s(\tilde{V}, \tilde{C}, \tilde{C}) = \sum_k \Phi_{sk}(\tilde{V}, \tilde{C}, \tilde{C})$

Представленные варианты моделей строились исходя из предположения, что процесс переработки шин и производство продукции  $k$  видов будет осуществляться на одном предприятии (вариант I) или на каждом ( $j = \overline{1,n}$ ), но уже со специализацией по видам продукции. Это упрощает организацию логистической цепочки «поставка шин – переработка и получение вторсырья – производство продукции».

### Библиографические ссылки

1. Гриндэл Т. Е., Алленби Б. Р. Промышленная экология. М., 2004.
2. Бобович Б. Б. Переработка промышленных отходов. М., 1992.
3. Лунева Г. Строительным отходам – вторую жизнь // Рециклинг отходов. 2006. № 2.
4. Интегрированная логистика накопительно-распределительных комплексов. М., 2003.
5. Экономико-математические методы и модели. Минск, 2000.