

Кирюхина Екатерина Александровна

**Модели и алгоритмы планирования переработки электронного лома  
с целью извлечения драгоценных металлов**

Специальность 05.13.01

«Системный анализ, управление и обработка информации (в производственной  
сфере)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва  
2011

Работа выполнена в НИТУ «МИСиС»  
на кафедре:  
Автоматизированных систем управления

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор  
Калашников Евгений Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Рожков Игорь Михайлович

кандидат технических наук, доцент  
Сергеев Леонид Георгиевич

Ведущее предприятие: ОАО «Союзцветметавтоматика»

Защита состоится 16 ноября 2011 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.07 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 119049, г.Москва, Ленинский проспект, д.4., К-325

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Автореферат разослан 10 октября 2011 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

кандидат технических наук, профессор  
Калашников Е. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Сложившаяся в России ситуация, связанная с накоплением отходов, ведет к опасному загрязнению окружающей природной среды и создает реальную экономическую проблему. В тоже время отходы являются значительными ресурсами вторичного сырья, которые можно охарактеризовать как возобновляемые сырьевые, материальные и топливно-энергетические ресурсы. С этим связана актуальность объекта диссертационного исследования - процесса переработки электронного лома с целью извлечения золота.

Широкое применение золота в постоянно развивающихся различных областях народного хозяйства требует вовлечения все большего его количества. Необходимо использовать все возможности для максимальной реализации ресурсов этого металла. Поэтому вторичные продукты являются важными источниками драгоценных металлов. Общее количество вторичного золота по разным оценкам составляет от 200 до 600 тонн. Основная его часть (примерно 450-500 тонн) содержится в электронном ломе, который получают при демонтаже военной и космической аппаратуры, а также инженерных и лабораторных приборов.

Переработка электронного лома - процесс сложный, технологически насыщенный. Необходимо разработать конструкцию плавильного комплекса, правильно выбрать технологию переработки лома, рассчитать возможные затраты, прибыль и быть готовым к различным изменениям рынка. Таким образом, планирование производственного процесса объединяет и охватывает все стороны организации производства. Без него деятельность предприятия не может быть достаточно эффективной.

В условиях постоянно развивающейся конкуренции снижение затрат приобретает особенно большое значение. В связи с этим возрастает потребность в повышении качества планирования хозяйственной деятельности предприятия, учете и изыскании резервов снижения себестоимости продукции. Для этого необходимо, например, внедрение новой техники, комплексная механизация и автоматизация производственных процессов, совершенствование технологии переработки электронного лома, совершенствование организации или структуры процесса переработки, улучшение материально-технического снабжения и прочие факторы. В данной работе было уделено особое внимание этапу подготовки сырья к дальнейшей переработке. Задача поиска оптимального состава сырья рассматривалась во многих отраслях промышленности, таких как пищевая, нефтеперерабатывающая, литейное производство и т. д., но что касается объекта исследования, то относительно электронного лома данная задача ставится впервые. Это связано и с тем, что не существует единой классификации электронного лома, поэтому за основу была взята классификация, разработанная Погосьяном А. Т [1]. Существует множество подходов к решению задачи оптимальной подготовки сырья в зависимости от особенностей каждого вида производства и поставленных целей. Целью данной работы является

снижение затрат на извлечение золота при переработке электронного лома. Исследования показали, что себестоимость извлечения золота при переработке различных видов электронного лома по разным технологиям зависит от содержания золота нелинейным образом, то есть себестоимость зависит от содержания в ломе остальных компонентов, их комбинаций и от особенностей используемых технологий переработки [2.1]. Следовательно, было выдвинуто предположение, что для каждой технологии существует такой химический состав электронного лома, при переработке которого по определенной технологии себестоимость извлечения драгоценных металлов будет наименьшая. Назовем этот состав электронного лома «идеальным» составом. Его можно получить путём смешивания сырья, поступающего на аффинажные предприятия. Снизить суммарные затраты на извлечение золота можно за счет получения максимального количества электронного лома с «идеальным» химическим составом из исходного сырья. Поэтому на основе комплекса математических моделей и алгоритмов в работе была предложена новая организационно-технологическая схема переработки золотосодержащих отходов, которая позволяет принять решение о целесообразности смешивания исходного сырья для получения электронного лома с «идеальным» химическим составом, дальнейшая переработка которого обеспечит снижение затрат на извлечение золота и повышение эффективности переработки электронного лома.

Таким образом, в диссертационной работе поставлена задача повышения эффективности процесса переработки электронного лома за счет получения «идеального» химического состава электронного лома на этапе подготовки сырья к переработке.

**Цель работы.** Целью работы является разработка и программная реализация математических моделей и алгоритмов, позволяющих повысить качество принимаемых решений при планировании процесса переработки электронного лома.

**Вопросы исследования:**

- Провести анализ существующих методов и моделей планирования производственных процессов;
- Исследовать зависимость себестоимости извлечения золота от химического состава сырья и на ее основе построить алгоритм поиска «идеального» химического состава электронного лома;
- Построить алгоритм получения электронного лома с «идеальным» химическим составом из имеющегося сырья и математическую модель максимизации его количества;
- Разработать программно-алгоритмический комплекс принятия решений при планировании переработки электронного лома и предложить алгоритмы корректировки плана закупок основных материалов.

### **Методы исследования.**

Научные исследования были выполнены на основе методов математического и целевого программирования, методов условной оптимизации и методов прямого поиска.

Для разработки программного обеспечения использовалось приложение для офисной программы Microsoft Excel на языке программирования Visual Basic for Applications (VBA, Visual Basic для приложений).

**Научная новизна** состоит в построении математических моделей и алгоритмов, на основе которых предложена новая организационно-технологическая схема подготовки и переработки золотосодержащих отходов, при этом:

- построен алгоритм поиска «идеального» химического состава электронного лома;
- построен алгоритм и математическая модель получения электронного лома с «идеальным» химическим составом из имеющегося в наличии сырья, дальнейшая переработка которого позволяет снизить затраты на извлечение золота;
- разработано программно-алгоритмическое принятие решений при планировании переработки электронного лома, работа с которым осуществляется в диалоговом режиме и поэтому позволяет провести анализ возможных вариантов решения задачи, и помогает принять решение о способе переработки сырья на этапе планирования.

**Практическая значимость.** Теоретические и методические разработки, выводы и практические рекомендации исследования позволяют решить вопросы оптимизации процесса переработки на этапе планирования. Разработано программное обеспечение, которое позволяет принять решение о возможности и целесообразности смешивания различных видов электронного лома на этапе подготовки сырья к переработке и о наиболее выгодном способе переработки с точки зрения минимизации затрат на извлечение золота.

**Апробация результатов.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- X-ой Международной научно-технической конференции «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» (п.Канака, АР Крым, 2007 г.);
- The XII-th International Conference "Cognitive Modelling in Linguistics"(CML-2010, Dubrovnik, Croatia);
- VIII-ой Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (г. Алматы, Республика Казахстан, 2011 г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 5 работ, включая 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 102 стр.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности выбранной темы, формулировка цели и направления исследований, содержание поставленных вопросов.

**В первой главе** рассматриваются вопросы вторичной металлургии, в частности существующие виды вторичного золотосодержащего сырья, его особенности и различные технологии, применяемые для его переработки. Также приведен обзор методов оптимизации, на основе которых в дальнейшем построен комплекс моделей и алгоритмов для оптимизации процесса переработки электронного лома с целью извлечения золота с минимальными затратами.

При получении драгоценных металлов из первичного рудного сырья металлурги в течение длительного производственного цикла располагают традиционным по составу исходным материалом. А при извлечении драгоценных металлов из вторичного сырья необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства:

- обязательна стадия предварительной подготовки к металлургическим операциям;
- технология должна быть универсальной и одновременно гибкой, т.е. в производстве драгоценных металлов из вторичного сырья должен быть набор операций, позволяющих при их различном сочетании перерабатывать достаточно широкий круг вторичных продуктов;
- необходим индивидуальный подход к различным видам вторичного сырья, обеспечивающий комплексную переработку и обезвреживание токсичных примесей.

В настоящее время основная масса драгоценных металлов сосредоточена в компьютерной и оргтехнике, блоках управления военной техники, радиотехнических устройствах, телекоммуникационном оборудовании.

Современные технологии позволяют извлекать из электронного лома в среднем по массе 0,114% золота, 0,414% серебра, 0,012% платины, 0,062% палладия и 10,6% меди. Стоимость этих металлов в ценах Лондонской биржи металлов превышает 20 000 долларов США для каждой тонны электронного лома. При этом стоимость золота составляет около 70% от указанной суммы.

При планировании переработки золотосодержащих отходов, в данном случае электронного лома, когда сырьевые ресурсы ограничены, возникает вопрос достижения экстремальных значений прибыли, себестоимости и экономии ресурсов, то есть прикладная оптимизационная задача, которая предполагает выбор наилучшего варианта состояния объекта с точки зрения предъявляемых требований (критерия оптимальности). Все оптимизационные прикладные задачи имеют общую структуру. Их можно определить как задачи минимизации (максимизации) некоторого вектора показателей эффективности или полезности, являющегося функцией вектора аргумента, компоненты которого удовлетворяют системе ограничений.

В диссертационном исследовании целью является достижение минимальных суммарных затрат на извлечение золота при переработке электронного лома. Себестоимость продукции

является важнейшим обобщающим показателем, характеризующим производственную деятельность предприятия. Постоянное снижение себестоимости продукции – основной источник увеличения дохода. В процессе переработки электронного лома в себестоимости продукции в среднем затраты на сырье и основные материалы составляют около 60%, на топливо и энергию около 10%. Таким образом, на долю этих статей себестоимости приходится примерно 70% общих затрат. Поэтому качественная подготовка исходного сырья к металлургической переработке оказывает большое влияние на конечные технико-экономические показатели переработки. Различают две группы подготовительных операций: механическую и химическую подготовку. В данной работе предлагается перед технологической обработкой смешать исходное сырье в определенных пропорциях для получения «идеального» химического состава электронного лома для выбранной технологии переработки. Критерием эффективности при смешивании выступает минимум себестоимости извлечения 1 кг золота из лома. Получение «идеального» состава электронного лома позволяет снизить затраты на извлечение золота за счет улучшения использования исходного сырья.

В основе алгоритма определения «идеального» состава электронного лома лежат математические методы оптимизации. Существует множество методов оптимизации. Не существует универсального, поэтому выбор метода зависит от специфики задачи. Существует несколько признаков, по которым осуществляется выбор методов оптимизации. Это сочетание видов целевых функций и ограничений, размерность задачи, вид доступной информации и т. д. В задаче поиска «идеального» химического состава основной проблемой является трудности с построением математической модели объекта. В качестве целевой функции выступает себестоимость извлечения 1 кг золота при переработке электронного лома с «идеальным» химическим составом. Установить явную зависимость значений себестоимости от химического состава сырья представляет собой непростую задачу. Одной из основных причин сложности построения модели – это сложные взаимозависимости, для анализа которых требуются большие затраты ресурсов. Для определения значений себестоимости извлечения золота из электронного лома с любым химическим составом был разработан программно-алгоритмический комплекс. Поэтому для построения алгоритма поиска «идеального» состава электронного лома в работе было отдано предпочтение методам прямого поиска, для работы которых достаточно значений целевой функции.

В данном случае была выбрана комбинация метода случайного поиска и метода Нелдера-Мида. Так как характерной чертой метода случайного поиска является некоторая неопределенность результата оптимизации, вызванная случайным характером поиска, то очевидно, что каждый раз при поиске «идеального» химического состава электронного лома, результат будет несколько отличаться, что в рамках данной задачи нежелательно. Использование же только метода Нелдера-Мида может приводить к неверному ответу. То есть, он находит

локальный экстремум и может «застрять» в одном из них. В данной задаче метод Нелдера-Мида «крутился» бы в области рядом с исходной точкой, но далеко уйти бы не смог. Главным недостатком этого метода является недоказанность сходимости. Этот вывод позволяет рекомендовать использование комбинации метода случайного поиска с методом Нелдера-Мида так, чтобы на начальных итерациях для поиска грубого приближения к решению применялся метод случайного поиска, а для уточнения решения – метод Нелдера-Мида.

После нахождения «идеального» химического состава для каждой технологии необходимо определить, в каких пропорциях требуется смешать исходное сырье для его получения. Кроме того, нам необходимо получить как можно больше сырья с «идеальным» составом. В данной задаче целевая функция и ограничения линейные, поэтому для решения задачи оптимизации с целью получения максимально возможного количества электронного лома с «идеальным» химическим составом из имеющегося на складе исходного сырья в работе использовались методы линейного программирования.

**Во второй главе** на основе построенных математических моделей и алгоритмов предложена новая организационно-технологическая схема подготовки и дальнейшей переработки электронного лома.

Исходя из рассуждений в первой главе, получить «идеальные» составы лома возможно из имеющегося на складе сырья. Для этого необходимо воспользоваться математической моделью максимизации количества «идеального» состава электронного лома, при помощи которой можно определить в каких количествах необходимо смешать имеющееся сырье. Однако надо учитывать возможно ли вообще получить желаемый состав и хватит ли того сырья, что есть в наличии. Для того чтобы учесть все детали, была разработан укрупненный алгоритм решения поставленной задачи, представленный на рисунке 3.

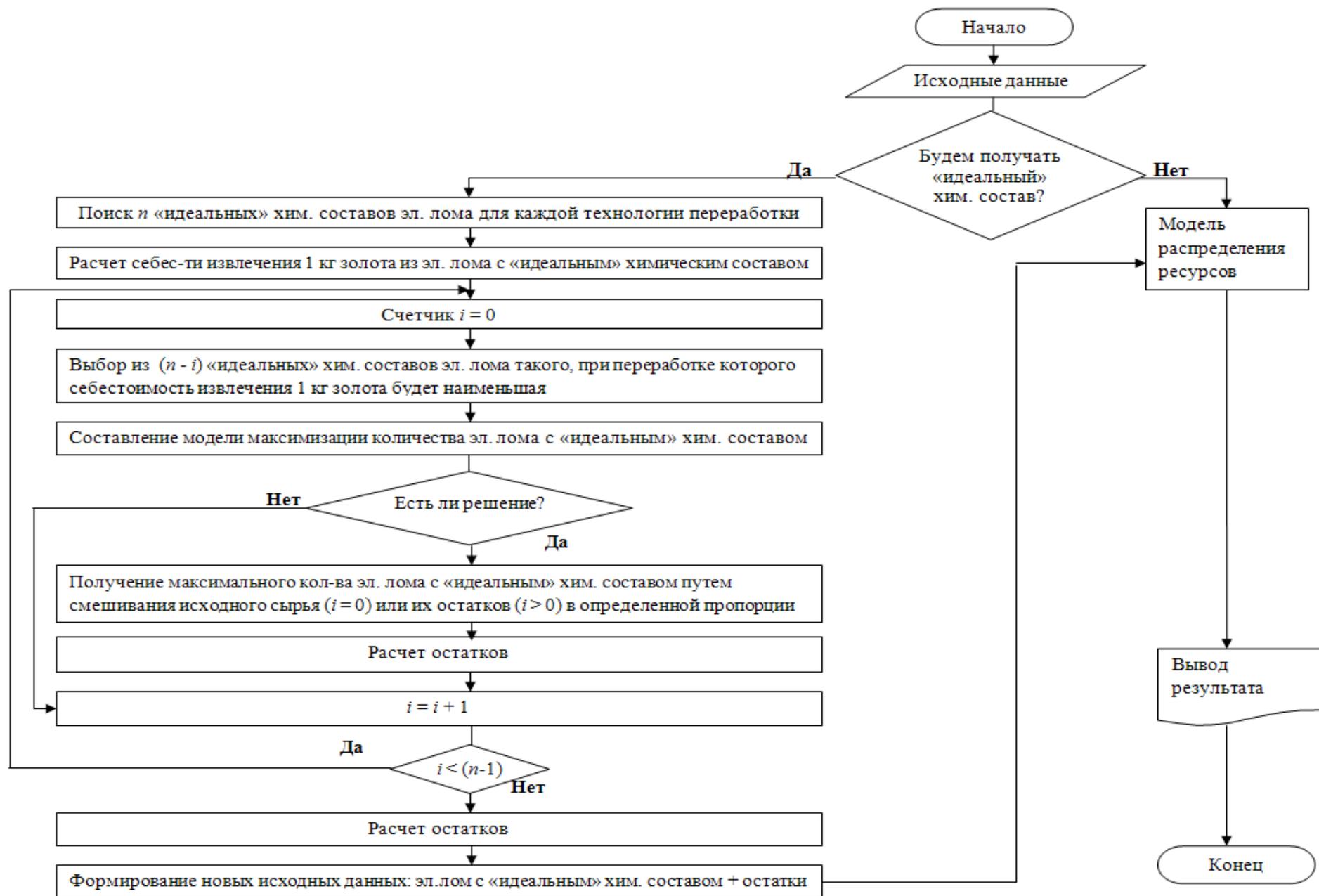


Рисунок 3 – Алгоритм подготовки и переработки электронного лома

Основные этапы предложенного алгоритма подготовки и переработки электронного лома:

- выбор ЛПР пути решения задачи в зависимости от возможности и целесообразности прибегнуть к смешиванию сырья на этапе его подготовки к переработке;
- поиск «идеального» химического состава электронного лома для каждой технологической схемы;
- определение пропорций исходного сырья для получения максимально возможного количества сырья с «идеальным» составом;
- оптимальное распределение по схемам переработки полученного лома с «идеальным» составом и остатков исходного сырья;
- расчет суммарных затрат.

В зависимости от выбора ЛПР существуют 2 пути:

1 путь - применение модели распределения ресурсов (без смешивания исходного сырья)

[1].

Математическая модель минимизации суммарных затрат при формировании оптимального плана переработки формулируется следующим образом: необходимо найти  $x_{ij}$  – количество  $i$ -го вида электронного лома, перерабатываемого по  $j$ -ой технологии, удовлетворяющее следующим ограничениям.

1) Ограничение на объем поставок сырья (на 1 год):

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = b_i, \quad i = 1, 4, 6. \quad (1)$$

$b_i$  – количество  $i$ -го вида электронного лома, т.

Имеется возможность увеличения поставок электронного лома с составом № 2, 3 и 5 в случае, если превышение будет небольшим, а рентабельность будет удовлетворительной. То есть,

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \geq b_i, \quad i = 2, 3, 5. \quad (2)$$

2) Ограничение на время работы оборудования.

$$\sum_{i=1}^m \frac{x_{ij}}{P_{ij}} \leq T_j, \quad j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

$T_j$  – время работы оборудования при переработке электронного лома по  $j$ -ой технологии, г;

$P_{ij}$  – годовая производственная мощность оборудования при переработке  $i$ -го вида электронного лома по  $j$ -ой технологии, т/год;

В данной задаче целью является достижение минимальных суммарных затрат на извлечение золота при переработке электронного лома по различным технологиям.

Целевая функция минимизации суммарных затрат выглядит следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \rightarrow \min. \quad (4)$$

$C_{ij}$  – себестоимость извлечения 1 кг золота при переработке каждого вида сырья по каждой из 6 технологий, млрд. руб.

2 путь – смешивание имеющихся в наличии видов электронного лома для получения максимального количества электронного лома с «идеальным» химическим составом и дальнейшая его переработка [2].

Математическая модель максимизации количества электронного лома с «идеальным» химическим составом<sup>1</sup> формулируется следующим образом: определить  $x_i$  – количество  $i$ -го вида электронного лома, необходимое для получения требуемого «идеального» химического состава электронного лома, удовлетворяющее следующим ограничениям.

– Ограничение на объем поставок сырья (на 1 год):

$$x_i \leq b_i, \quad (5)$$

$b_i$  – количество  $i$ -го вида исходного сырья на складе, т.

– Ограничение на производительность:

$$\sum_{i=1}^m x_i \leq T \cdot P, \quad (6)$$

$T$  – время работы оборудования, г;  $P$  – годовая производственная мощность оборудования при переработке электронного лома с «идеальным» химическим составом, т/год;

– Ограничения на процентные концентрации:

$$\varepsilon_k^H \sum_{i=1}^m x_i \leq \sum_{i=1}^m a_{ik} x_i \leq \varepsilon_k^B \sum_{i=1}^m x_i, \quad k = \overline{1, K}. \quad (7)$$

$a_{ik}$  – процентная концентрация  $k$ -го химического элемента в  $i$ -ом виде электронного лома, %;  $K$  – количество химических элементов, содержащихся в электронном ломе;  $\varepsilon_k$  – процентная концентрация  $k$ -го химического элемента в «идеальном» составе электронного лома, %;  $\varepsilon_k^H$  – нижний предел процентной концентрации  $k$ -го химического элемента в «идеальном» составе электронного лома, %;  $\varepsilon_k^B$  – верхний предел процентной концентрации  $k$ -го химического элемента в «идеальном» составе электронного лома, %.

При поиске «идеального» химического состава электронного лома методами прямого поиска точность найденного решения составила 0,001. Поэтому предел отклонения процентной концентрации химических элементов в «идеальном» составе электронного лома предполагается не больше 0,001 %.

<sup>1</sup> Математическая модель максимизации количества электронного лома с «идеальным» химическим составом составляется отдельно для каждой технологии переработки лома

В данной задаче целью является достижение минимальных суммарных затрат на извлечение золота при переработке составов электронного лома за счет получения максимального количества электронного лома с «идеальным» химическим составом.

Целевая функция максимизации количества электронного лома с «идеальным» химическим составом выглядит следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^m x_i \rightarrow \max. \quad (8)$$

При этом для получения «идеального» химического состава электронного лома последовательно были использованы метод случайного поиска для нахождения начальной точки и метод Нелдера-Мида для непосредственного поиска «идеального» химического состава электронного лома.

Формальная постановка задачи для построения алгоритма поиска «идеального» химического состава электронного лома следующая: требуется найти такой «идеальный» химический состав электронного лома  $X = \{x_k\}$ , при котором целевая функция  $f(X)$  – себестоимость извлечения 1 кг золота при переработке электронного лома с «идеальным» химическим составом – будет минимальна.

В алгоритме учитываются следующие ограничения:

1) Так как  $x_k$  представляет собой процентное содержание  $k$ -го химического элемента в «идеальном» химическом составе электронного лома, то пределы изменения  $x_k$ :

$$0 \leq x_k \leq 100, \quad (9)$$

$x_k$  – процентное содержание  $k$ -го химического элемента в «идеальном» химическом составе электронного лома.

2) Процентное содержание элементов в «идеальном» химическом составе электронного лома будет в пределах от минимального до максимального значения их содержания в исходном сырье:

$$\min(a_{ki}) \leq x_k \leq \max(a_{ki}), \quad (10)$$

где  $a_{ki}$  - содержание  $k$ -го химического элемента в  $i$ -м виде электронного лома, %.

В качестве начальной точки для метода случайного поиска выступает химический состав электронного лома с наименьшей себестоимостью извлечения 1 кг золота по выбранной схеме. Далее, используя алгоритм метода случайного поиска, получаем в результате точку, которая будет являться начальной точкой для метода Нелдера-Мида. В результате применения метода Нелдера-Мида мы находим точку, которая представляет собой содержание  $k$ -го элемента в «идеальном» химическом составе электронного лома. При этом значения целевой функции считаются в отдельном модуле программно-алгоритмического комплекса.

В итоге для каждой схемы переработки мы находим «идеальный» химический состав электронного лома и рассчитываем себестоимость извлечения 1 кг золота при его переработке по выбранной схеме. Далее из полученных «идеальных» составов электронного лома выбираем состав с наименьшей себестоимостью извлечения золота и составляем модель максимизации его количества. При помощи данной модели мы определяем возможность получения данного «идеального» состава электронного лома из имеющегося сырья путем смешивания сырья в определенной пропорции. Из оставшегося сырья мы пытаемся получить следующий «идеальный» состав электронного лома с наименьшей себестоимостью извлечения золота и так далее. Полученные «идеальные» составы электронного лома и остатки исходного сырья распределяем по технологиям переработки лома при помощи модели распределения ресурсов.

В результате использования предложенной организационно-технологической схемы переработки золотосодержащих отходов предприятие сможет снизить затраты за счет улучшения использования сырья.

**В третьей главе** представлена структура программно-алгоритмического комплекса поиска принятия решений при планировании переработки электронного лома с учетом возможности получения электронного лома с «идеальным» химическим составом.

Применение методов прямого поиска для нахождения «идеального» химического состава электронного лома предполагает большое количество итераций. Чем больше размерность задачи, тем большее количество итераций. В частности это является характерной особенностью метода случайного поиска, поскольку при выборе направления поиска не используется информация о целевой функции  $f(x)$ . Разработанное программное обеспечение позволяет быстро получить «идеальные» химические составы электронного лома для каждой технологической схемы переработки, определить оптимальный план переработки и рассчитать затраты на извлечение золота.

Для решения поставленной задачи было разработано приложение для офисной программы Microsoft Excel на языке программирования Visual Basic for Applications (VBA, Visual Basic для приложений). Работа системы осуществляется в диалоговом режиме, что дает возможность ЛПР принимать решения. В качестве ЛПР может выступать технолог на предприятии по переработке вторичного сырья. Диалог осуществляется на этапе выбора пути расчета затрат на переработку лома. То есть, ЛПР принимает решение, прибегнуть ли к смешиванию сырья для получения «идеального» химического состава электронного лома для каждой технологии переработки или воспользоваться моделью распределения ресурсов.

Управление работой программно-алгоритмического комплекса осуществляется через меню в графическом интерфейсе пользователя процессора электронных таблиц Microsoft Excel. С помощью пунктов меню к исполнению вызываются различные блоки комплекса (рис. 4).

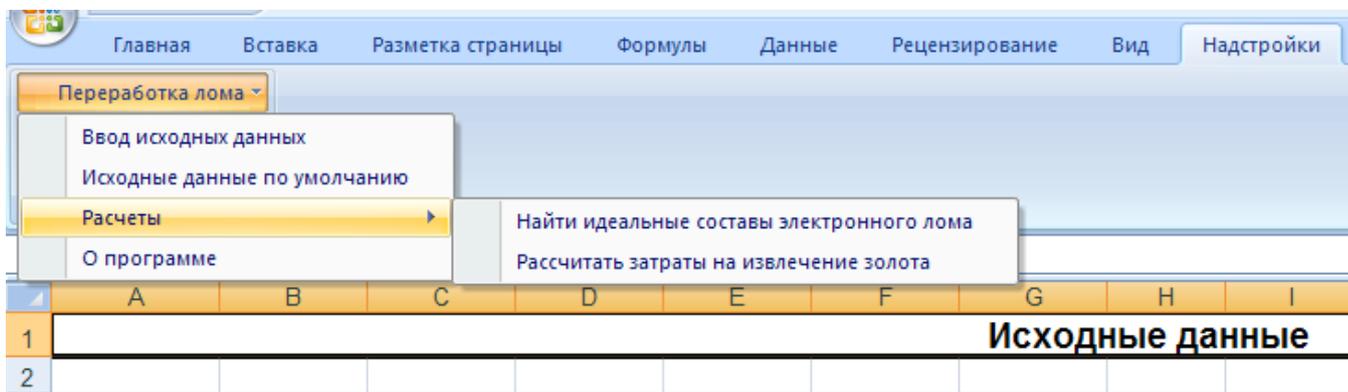


Рисунок 4 – Меню управления программно-алгоритмическим комплексом

При разработке приложения использовался шаблон проектирования Модель-представление-контроллер. Модель-представление-контроллер (Model-view-controller, MVC) – архитектура программного обеспечения, в которой модель данных приложения, пользовательский интерфейс и управляющая логика разделены на три отдельных компонента, так, что модификация одного из компонентов оказывает минимальное воздействие на другие компоненты.

Компонент «Представление» включает в себя исходные данные задачи на листах Excel. Пользователь может вносить в них изменения стандартными методами.

Для изменения параметров модели предназначен компонент «Контроллер». С помощью него пользователь может изменить количество видов электронного лома и схем его переработки. В компонент «Контроллер» входят два модуля и форма:

- а) модуль mdlMenu отвечает за создание и удаление пользовательского меню;
- б) модуль mdlTemplate отвечает за создание шаблона исходных данных и заполнения шаблона значениями по умолчанию;
- в) форма frmData предназначена для ввода количества видов электронного лома и схем его переработки.

В компонент «Модель» входят пять модулей, в результате совместной работы которых осуществляется поиск решения. Здесь реализованы описанные алгоритмы методов случайного поиска и Нелдера-Мида:

- а) модуль mdlMain координирует работу остальных модулей и осуществляет взаимодействие с компонентом «Контроллер»;
- б) в модуле mdlSimplex реализован поиск «идеального» химического состава электронного лома методом Нелдера-Мида;
- в) модуль mdlRandomWalk осуществляет поиск методом случайного поиска начальной точки для метода Нелдера-Мида;
- г) модуль mdlCost отвечает за расчет суммарных затрат на извлечение золота при переработке электронного лома;

д) модуль mdlSolver осуществляет поиск оптимального плана переработки и расчет затрат на извлечение золота при помощи вызова надстройки Excel «Поиск решения»/«Solver».

Таким образом, система позволяет:

- определить содержание химических элементов в так называемом «идеальном» химическом составе электронного лома для каждой технологической схемы переработки электронного лома;

- рассчитать количество исходного сырья на складе, необходимое для получения «идеального» состава электронного лома;

- рассчитать себестоимость извлечения 1 кг золота при переработке электронного лома с «идеальным» химическим составом по каждой технологической схеме;

- определить оптимальный план переработки электронного лома с учетом или без учета смешивания сырья и рассчитать затраты на извлечение золота;

- дает возможность изменять основные параметры, такие как цена электронного лома и основных материалов, заработная плата рабочих, расходы на содержание и эксплуатацию оборудования, цеховые расходы, которые могут меняться с течением времени, что отражает системный подход к решению проблемы.

**В четвертой главе** рассмотрены результаты расчета оптимального плана переработки электронного лома, используя предложенную организационно-технологическую схему переработки электронного лома и варианты формирования плана закупки основных материалов.

Результаты использования программно-алгоритмического комплекса показали, что в данной задаче для каждой технологии переработки электронного лома возможно определить такой химический состав сырья, при переработке которого себестоимость извлечения золота будет наименьшая (табл. 1).

Так как программно-алгоритмический комплекс позволяет рассчитать себестоимость извлечения золота для любого химического состава электронного лома, были найдены значения себестоимости при переработке лома с полученными «идеальными» составами лома (таблица 2).

Получить «идеальный» состав электронного лома можно, смешивая различные виды электронного лома в определенной пропорции. Результаты решения задачи определения пропорций смешивания исходного сырья для получения максимального количества «идеального» состава электронного лома представлены детально в таблице 3.

Таблица 1. – Содержание химических элементов в «идеальном» составе электронного лома, %

Элементы	"Идеальный" состав 1 (для схемы 1)	"Идеальный" состав 2 (для схемы 2)	"Идеальный" состав 3 (для схемы 3)	"Идеальный" состав 4 (для схемы 4)	"Идеальный" состав 5 (для схемы 5)	"Идеальный" состав 6 (для схемы 6)
<b>Au</b>	0,937	0,1	0,735	0,735	0,336	0,247
<b>Ag</b>	0,445	0,2	1,034	1,034	2,291	2,289
<b>Cu</b>	2,282	30,119	9,187	9,187	21,065	22,636
<b>Al</b>	31,401	15,435	26,48	26,48	16,98	15,327
<b>Fe</b>	21,132	34,1	18,803	18,803	13,227	12,109
<b>Ni</b>	1,336	1,068	1,975	1,975	3,068	3,214
<b>Pb</b>	0,95	3,696	1,627	1,627	2,633	2,75
<b>Sn</b>	1,248	3,75	1,304	1,304	1,386	1,7
<b>МПП</b>	0,114	0,01	0,396	0,396	0,828	0,82
<b>Прочие</b>	40,155	11,522	38,459	38,459	38,185	38,907
<b>Всего:</b>	100	100	100	100	99,999	99,999

Таблица 2. – Значения себестоимости извлечения 1 кг золота при переработке электронного лома с «идеальным» химическим составом, руб.

<b>"Идеальный" химический состав</b>	<b>Себестоимость извлечения 1 кг золота, руб</b>
для схемы 1	68570,62
для схемы 2	50747,18
для схемы 3	74791,68
для схемы 4	197938,68
для схемы 5	162792,36
для схемы 6	203420,45

При решении задачи поиска оптимального плана переработки электронного лома с учетом получения «идеального» состава электронного лома на этапе подготовки сырья было получено, что суммарные затраты на извлечение золота составят 22,513 млрд. руб. В то время как использование изначально только задачи распределения ресурсов требует затрат в размере 23,598 млрд. руб., что дороже на 1,085 млрд. руб. Сравнительные результаты представлены в таблице 4.

Таким образом, использование организационно-технологической схемы переработки золотосодержащих отходов позволяет оптимизировать процесс переработки составов электронного лома, то есть сократить затраты на извлечение золота.

Но математическая модель распределения ресурсов не учитывает наличие основных материалов, а именно кислот ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) и осадителя ( $\text{FeSO}_4$ ) на складе предприятия.

Таблица 3. Результат смешивания исходного сырья для получения электронного лома с «идеальным» химическим составом для каждой схемы переработки

№ итерации	Выбор "идеального" хим. состава эл. лома с наименьшей себестоимостью извлечения 1 кг золота	Количество исходного сырья, участвующего в смешивании для получения эл.лома с "идеальным" хим. составом, тонны						Остатки, тонны	Максимальное количество эл.лома с "идеальным" хим. составом, тонны
		исходное сырье №1	исходное сырье №2	исходное сырье №3	исходное сырье №4	исходное сырье №5	исходное сырье №6		
1	"идеальный" состав для схемы 2	0,0017	–	–	–	50,0000	5,0007	сырье №1 = 16,98; сырье №2 = 100; сырье №3 = 150; сырье №4 = 20; сырье №5 = 0; сырье №6 = 5.	55,0025
2	"идеальный" состав для схемы 1	–	0,0001	–	0,5001	–	4,9993	сырье №1 = 16,98; сырье №2 = 100; сырье №3 = 150; сырье №4 = 19,50; сырье №5 = 0; сырье №6 = 0.	5,4995
3	"идеальный" состав для схемы 3	НЕТ РЕШЕНИЯ						сырье №1 = 16,98; сырье №2 = 100; сырье №3 = 150; сырье №4 = 19,50; сырье №5 = 0; сырье №6 = 0.	–
4	"идеальный" состав для схемы 5	НЕТ РЕШЕНИЯ						сырье №1 = 16,98; сырье №2 = 100; сырье №3 = 150; сырье №4 = 19,50; сырье №5 = 0; сырье №6 = 0.	–
5	"идеальный" состав для схемы 4	НЕТ РЕШЕНИЯ						сырье №1 = 16,98; сырье №2 = 100; сырье №3 = 150; сырье №4 = 19,50; сырье №5 = 0; сырье №6 = 0.	–
6	"идеальный" состав для схемы 6	0,0070	99,9999	10,0116	–	–	–	сырье №1 = 16,99; сырье №2 = 0; сырье №3 = 139,99; сырье №4 = 19,50; сырье №5 = 0; сырье №6 = 0.	110,0185

Таблица 4 – Сравнительные результаты получения оптимального плана переработки с учетом и без учета получения «идеального» химического состава электронного лома на этапе подготовки сырья к переработке

Выбор пути переработки электронного лома	План переработки электронного лома, в тоннах							Итого переработано сырья, тонны	Необходимое время переработки	Максимальное время переработки	Суммарные затраты на извлечение золота, млрд. руб
	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4	Схема 5	Схема 6					
с учетом получения «идеального» химического состава электронного лома на этапе подготовки сырья	Исходное сырье 1	10,56	6,44	0	0	0	0	347	Схема 1 - 1 год Схема 2 - 1 год Схема 3 - 25 дней	Схема 1 - 1 год Схема 2 - 1 год Схема 3 - 1 год Схема 4 - 1 год Схема 5 - 1 год Схема 6 - 1 год	22, 513
	Исходное сырье 2	0	0	0	0	0	0				
	Исходное сырье 3	135,87	0	4,13	0	0	0				
	Исходное сырье 4	19,50	0	0	0	0	0				
	Исходное сырье 5	0	0	0	0	0	0				
	Исходное сырье 6	0	0	0	0	0	0				
	"Идеальный" состав 1	5,50	0	0	0	0	0				
	"Идеальный" состав 2	0	55,00	0	0	0	0				
	"Идеальный" состав 3	0	0	0	0	0	0				
	"Идеальный" состав 4	0	0	0	0	0	0				
"Идеальный" состав 5	0	0	0	0	0	0					
"Идеальный" состав 6	0,00	109,98	0,02	0	0	0					
без учета смешивания	Схема 1	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4	Схема 5	Схема 6	347	Схема 1 - 7,5 мес Схема 2 - 1 год Схема 3 - 1 год	Схема 1 - 1 год Схема 2 - 1 год Схема 3 - 1 год Схема 4 - 1 год Схема 5 - 1 год Схема 6 - 1 год	23,598
	Исходное сырье 1	17	0	0	0	0	0				
	Исходное сырье 2	62,03	0	37,97	0	0	0				
	Исходное сырье 3	0	121,43	28,57	0	0	0				
	Исходное сырье 4	20	0	0	0	0	0				
	Исходное сырье 5	0	50	0	0	0	0				
	Исходное сырье 6	10	0	0	0	0	0				

После решения задачи (таблица 4) становится возможным расчет требуемого количества основных материалов, используя формулу (11).

$$\Delta D_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ijk} x_{ij}^* - D_k, \quad (11)$$

где  $\Delta D_k$  – подлежащее закупке количество  $k$ -го вида основного материала, т;  $x_{ij}^*$  – оптимальный план переработки электронного лома, т;  $a_{ijk}$  – количество  $k$ -го вида основного материала, требуемого для переработки 1 тонны  $i$ -го электронного лома по  $j$ -ой технологии;  $D_k$  – количество  $k$ -го вида основного материала на складе, т.

В связи с этим для проведения расчетов оптимальных закупок основных материалов в настоящей работе предлагается использование одного из вариантов линейного программирования – целевого программирования.

Общий вид математической постановки задачи можно представить в следующем виде:

1) Ограничения на выполнение годового плана по переработке данных видов электронного лома:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} + d_{i1}^- = B_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (13)$$

где  $m$  – количество видов электронного лома;  $x_{ij}$  – количество тонн  $i$ -го вида электронного лома, перерабатываемого по  $j$ -ой технологии;  $d_{i1}^-$  – невыполнение плана переработки  $i$ -го вида электронного лома;  $B_i$  – плановый объем переработки  $i$ -го вида электронного лома.

2) Ограничение на наличие основных материалов на складе:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ijk} x_{ij} + d_{k2}^- - d_{k2}^+ = D_k, \quad k = \overline{1, K}, \quad (14)$$

$$d_{k2}^- \cdot d_{k2}^+ = 0,$$

где  $k$  – индекс  $k$ -го вида основного материала;  $K$  – количество видов основных материалов;  $d_{k2}^-, d_{k2}^+$  – недорасход/дозакупка  $k$ -го вида основного материала при переработке  $i$ -го вида электронного лома.

3) Ограничение на время работы оборудования:

$$\sum_{i=1}^m \frac{x_{ij}}{P_{ij}} + d_{j3}^- \leq T_j, \quad (15)$$

где  $d_{j3}^-$  – простой оборудования;  $T_j$  – фонд рабочего времени оборудования при переработке электронного лома по  $j$ -ой технологии, в годах;  $P_{ij}$  – годовая производственная мощность оборудования при переработке  $i$ -го вида электронного лома по  $j$ -ой технологии, т/год.

Целевую функцию можно записать в следующем виде:

$$\text{Min } Z = P_1(W_{11^-} d_{11}^- + W_{21^-} d_{21}^- + \dots + W_{m1^-} d_{m1}^-) + P_2(W_{12^+} d_{12}^+ + W_{22^+} d_{22}^+ + \dots + W_{K2^+} d_{K2}^+) + P_3(W_{12^-} d_{12}^- + W_{22^-} d_{22}^- + \dots + W_{K2^-} d_{K2}^-) + P_4(W_{13^-} d_{13}^- + W_{23^-} d_{23}^- + \dots + W_{m3^-} d_{m3}^-), \quad (16)$$

где  $Z$  – целевая функция, записанная в форме задачи целевого программирования;  $P_l$  – приоритет  $l$ -ой цели,  $l = \overline{1,4}$ ;  $W_l^-$  – вес отрицательной переменной отклонения  $l$ -ой цели;  $W_{l^+}$  – вес положительной переменной отклонения  $l$ -ой цели (знак  $+$  означает, что минимизация выполняется в соответствии с приоритетом записанных целей, носит условное обозначение).

В данном случае цель, имеющая наивысший приоритет  $P_1$  – минимизировать недоиспользование электронного лома (минимизировать остатки сырья на складе), вторая по значимости цель  $P_2$  – минимизировать дозакупку основных материалов, третья  $P_3$  – минимизировать недоиспользование основных материалов и четвертая  $P_4$  – минимизировать простой оборудования. При этом вес переменных отклонения будет одинаковый.

Для поставленной задачи целевая функция выглядит следующим образом:

$$\text{Min } Z = P_1(1d_{11}^- + 1d_{21}^- + 1d_{31}^- + 1d_{41}^- + 1d_{51}^- + 1d_{61}^-) + P_2(1d_{12}^+ + 1d_{22}^+ + 1d_{32}^+ + 1d_{42}^+) + P_3(1d_{12}^- + 1d_{22}^- + 1d_{32}^- + 1d_{42}^-) + P_4(1d_{13}^- + 1d_{23}^- + 1d_{33}^- + 1d_{43}^- + 1d_{53}^- + 1d_{63}^-) \quad (17)$$

Итак, для выполнения оптимального плана переработки согласно формуле (11) необходимо закупить 22 тонн  $H_2SO_4$ , 18 тонн  $HCl$ , 42 тонны  $HNO_3$  и 50 кг (0,05 тонн)  $FeSO_4$ .

Рассмотрим варианты изменения запасов основных материалов:

1) Так как для протекания химических реакций нам необходим каждый из реагентов, вариант отсутствия какого-либо материала рассматривать не будем. Поэтому рассмотрим, удастся ли выполнить план переработки, если количество одного из реагентов, например серной кислоты, уменьшится в 2 раза?

В таблице 5 приведены результаты, а именно, при уменьшении запаса серной кислоты переработать данное количество электронного лома не удастся. План переработки можно выполнить в случае дозакупки серной кислоты. Тоже относится и к другим реагентам.

2) Запасы материалов оставим неизменными, а план переработки увеличится:

а) Допустим, сырье №1, №3 и №5 увеличится на 10 тонн.

В таблице 5 показано, что с использованием имеющегося запаса основных материалов выполнение плана переработки при увеличении количества сырья №1, №3 и №5 на 10 тонн возможно. При этом распределение сырья по схемам переработки и суммарные затраты изменятся.

б) Теперь увеличим на 10 тонн количество других видов сырья, а именно №2, №4 и №6.

В таблице 5 показано, что с использованием имеющегося запаса основных материалов выполнение плана переработки при увеличении количества сырья №2, №4 и №6 на 10 тонн невозможно. План переработки достигается за счет перерасхода соляной кислоты на 33 кг.

Чтобы избежать перерасхода, для соляной кислоты увеличим весовой коэффициент при соответствующей переменной отклонения в целевой функции. Получим,

$$\text{Min}Z = P_1 (1d_{11}^- + 1d_{21}^- + 1d_{31}^- + 1d_{41}^- + 1d_{51}^- + 1d_{61}^-) + P_2 (1d_{12}^+ + 2d_{22}^+ + 1d_{32}^+ + 1d_{42}^+) + P_3 (1d_{12}^- + 1d_{22}^- + 1d_{32}^- + 1d_{42}^-) + P_4 (1d_{13}^- + 1d_{23}^- + 1d_{33}^- + 1d_{43}^- + 1d_{53}^- + 1d_{63}^-) \quad (18)$$

Перерасход соляной кислоты уменьшился (табл. 6), но избежать его не удалось.

Во избежание перерасхода соляной кислоты изменим приоритеты целевой функции. Теперь цель, имеющая наивысший приоритет  $P_1$  – минимизировать дозакупку основных материалов, вторая по значимости цель  $P_2$  – минимизировать недовыполнение плана переработки электронного лома, третья  $P_3$  – минимизировать недорасход основных материалов и четвертая  $P_4$  – минимизировать простой оборудования. При этом вес переменных отклонения оставим одинаковым.

Запишем целевую функцию по-другому.

$$\text{Min}Z = P_1 (1d_{12}^+ + 1d_{22}^+ + 1d_{32}^+ + 1d_{42}^+) + P_2 (1d_{11}^- + 1d_{21}^- + 1d_{31}^- + 1d_{41}^- + 1d_{51}^- + 1d_{61}^-) + P_3 (1d_{12}^- + 1d_{22}^- + 1d_{32}^- + 1d_{42}^-) + P_4 (1d_{13}^- + 1d_{23}^- + 1d_{33}^- + 1d_{43}^- + 1d_{53}^- + 1d_{63}^-) \quad (19)$$

Изменяя приоритеты целей в целевой функции, выполнение плана переработки при увеличении количества сырья №2, №4 и №6 на 10 тонн с использованием имеющегося запаса основных материалов возможно. При этом распределение сырья по схемам переработки и суммарные затраты изменятся (табл. 7).

В результате расчетов получаются варианты решения, не соответствующие минимальным затратам, но при использовании этих вариантов удастся выполнить план переработки электронного лома в случае недостаточного количества какого-либо реагента в данный момент на складе. То есть методы целевого программирования позволяют получить эффективное решение задачи с точки зрения ЛПР, которое не всегда будет оптимальным с точки зрения экстремума целевой функции.

Помимо повышения экономической эффективности за счёт получения максимального количества электронного лома с «идеальным» составом путем смешивания исходного сырья, результаты использования предложенной модели целевого программирования позволили получить дополнительный экономический эффект за счёт оптимизации формирования запасов основных материалов.

Таким образом, результаты диссертационного исследования показали, что предложенные в работе математические модели и алгоритмы позволяют снизить суммарные затраты на извлечение золота при переработке электронного лома, а также оценить потребность в дополнительных материальных ресурсах.

Таблица 5 - Варианты изменения складских запасов

№	Варианты изменения запасов основных материалов	Недорасход электронного лома (тонны)	Основные материалы		Простой оборудования	Удастся выполнить план?	План переработки						Суммарные затраты на извлечение золота, млрд. руб.	
			Недорасход	Дозакупка										
1	Удастся ли выполнить план переработки, если количество одного из реагентов, например серной кислоты, уменьшится в 2 раза?	—	HCL – 204 кг HNO <sub>3</sub> – 552 кг FeSO <sub>4</sub> – 40 кг	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – 10тонн	Схема 1 – 2 мес Схема 4 – 1 год Схема 5 – 1 год Схема 6 – 1 год	Нет	—						—	
2	Запасы материалов оставим неизменными, а план переработки увеличится:													
а)	Допустим, количество сырья №1, №3 и №5 увеличится на 10 тонн:	—	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – 465 кг HCL – 127 кг HNO <sub>3</sub> – 373кг FeSO <sub>4</sub> – 40 кг		Схема 3 – 2 мес Схема 4 – 1 год Схема 5 – 1 год Схема 6 – 1 год	Да	Сырье	Схемы						29, 346
								1	2	3	4	5	6	
							1	27	0	0	0	0	0	
							2	0	100	0	0	0	0	
							3	144,43	15,57	0	0	0	0	
							4	0	20	0	0	0	0	
5	0	25,86	34,14	0	0	0								
6	0	10	0	0	0	0								
б)	Допустим, количество сырья №2, №4 и №6 увеличится на 10 тонн:	—	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – 274кг FeSO <sub>4</sub> – 40 кг	HCL – 33кг	Схема 1 – 5мес Схема 5 – 1 год Схема 6 – 1 год	Нет	—						—	

Таблица 6 – Результат увеличения весового коэффициента с целью избежать перерасхода соляной кислоты

Недорасход электронного лома (тонны)	Основные материалы		Простой оборудования	Удастся выполнить план?	План переработки	Суммарные затраты на извлечение золота, млрд. руб.
	Недорасход	Дозакупка				
—	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – 274кг FeSO <sub>4</sub> – 40 кг	HCL – 17кг	Схема 1 – 5мес Схема 5 – 1 год Схема 6 – 1 год	Нет	—	—

Таблица 7 – Результат изменения приоритетов целевой функции с целью избежать перерасхода соляной кислоты

Недорасход электронного лома (тонны)	Основные материалы		Простой оборудования	Удастся выполнить план?	План переработки						Суммарные затраты на извлечение золота, млрд. руб.	
	Недорасход	Дозакупка			Состав	Схемы						
						1	2	3	4	5	6	
—	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – 314кг HNO <sub>3</sub> – 77 кг FeSO <sub>4</sub> – 40 кг	—	Схема 1 – 5мес Схема 5 – 1год Схема 6 – 1год	Да	1	14,36	0	0	2,64	0	0	39,226
					2	0	51,38	0	58,62	0	0	
					3	87,34	62,66	0	0	0	0	
					4	0	30	0	0	0	0	
					5	0	7,39	42,61	0	0	0	
					6	0	20	0	0	0	0	

**В заключении** формулируются основные результаты работы.

Основная задача, которая решена в диссертационной работе – это задача повышения эффективности процесса переработки электронного лома, которая в свою очередь предусматривает решение трех подзадач:

- 1) задача оптимальной подготовки сырья к переработке;
- 2) задача поиска оптимального плана переработки электронного лома;
- 3) задача оценки потребности в основных материалах.

При этом основные результаты работы следующие:

- В работе исследовано влияние химического состава различных видов электронного лома на показатель себестоимости извлечения золота по различным технологиям. Данное исследование легло в основу разработки алгоритма поиска «идеального» химического состава электронного лома. Причем для каждой технологии переработки «идеальный» химический состав лома будет разным.

- Построен алгоритм и математическая модель получения электронного лома с «идеальным» химическим составом из имеющегося на складе сырья.

Разработка алгоритмов поиска и получения данного химического состава является ключевым моментом и научной новизной в работе. Именно за счет этого и происходит снижение затрат на переработку электронного лома, что показано в дальнейшем при решении следующей подзадачи поиска оптимального плана.

- Для автоматизации громоздких вычислений, было разработано программно-алгоритмическое обеспечение, позволяющее быстро получить результаты расчета оптимального плана переработки сырья с учетом и без учета предложенного подхода к оптимизации процесса переработки электронного лома. При этом работа с программой осуществляется в диалоговом режиме в связи с тем, что выбор пути расчета затрат, сравнение результатов и оценка целесообразности смешивания сырья на этапе его подготовки осуществляется ЛПП, так как состав вторичного золотосодержащего сырья непостоянен и не исключено, что в каких-то случаях будет невозможно получить «идеальный» химический состав сырья. Кроме того, программно-алгоритмический комплекс предусматривает возможность изменять такие параметры как цена электронного лома и основных материалов, заработная плата рабочих, расходы на содержание и эксплуатацию оборудования, цеховые расходы, которые могут меняться с течением времени, что отражает системный подход к решению проблемы.

- Так как в процессе переработки электронного лома в себестоимости продукции в среднем затраты на сырье и основные материалы составляют около 60%, то в третьей подзадаче кроме оптимального использования сырья, предложены модели и алгоритмы корректировки плана закупок основных материалов, позволяющие повысить эффективность использования материалов.

Таким образом, основным результатом работы является разработка математических моделей и алгоритмов, на основе которых предложена организационно-технологическая схема переработки золотосодержащего сырья, позволяющая повысить эффективность данного процесса. Результаты ее применения на примере 6 видов электронного лома, наиболее часто поступающих на предприятия по извлечению благородных металлов, и 6 технологий переработки [1] подтвердили правильность предположения, что получение электронного лома с «идеальным» химическим составом на этапе подготовки сырья к переработке способствует снижению суммарных затрат на извлечение золота. В данном примере, смешав сырье для получения «идеального» состава, суммарные затраты на его дальнейшую переработку составили 22,513 млрд. руб., а без учета предложенной подготовки сырья – 23,598 млрд. руб. Экономический эффект от внедрения предложенного подхода может составить около 1 млрд. руб. в год.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Калашников Е. А., Лолейт С. И., Кирюхина Е. А., Погосян А. Т.. Математическая модель оптимального планирования переработки электронного лома.// «Цветные металлы»№5, 2007. С. 102-104.
2. Стрижко Л. С., Лолейт С. И., Калашников Е. А., Кирюхина Е. А. Алгоритм рациональной переработки золотосодержащих отходов. // «Цветные металлы»№7, 2010. С.32-37.
3. Лолейт С.И., Калашников Е.А., Стрижко Л.С., Кирюхина Е.А., Голев А.Н. Оптимизация переработки золотосодержащих отходов // Тезисы докладов 10-й международной научно-технической конференции п. Канака, АК Крым (Украина), - 2007. С. 38-42.
4. Калашников Е. А., Кирюхина Е. А. Модели и алгоритмы рациональной переработки золотосодержащих отходов. // The XII-th International Conference "Cognitive Modeling in Linguistics" (CML-2010, Dubrovnik, Croatia).
5. Калашников Е. А., Кожитов С. Л., Кирюхина Е. А. Модели и алгоритмы планирования процесса переработки электронного лома с целью извлечения драгоценных металлов. //Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: тр. VIII международной конференции / редкол.: Л.В. Кожитов, (отв. ред.) [и др.]; ЮЗГУ; НИТУ «МИСиС» [и др.]; Курск 2011. (г. Алматы, 9-10 июня 2011 г.) С. 382-388.