



**ДЕРЕВЯНОВ Максим Юрьевич**

**Методология системного анализа и  
оптимизации сложно-структурированного  
комплекса переработки нефтесодержащих  
отходов в нефтегазовой промышленности**

2.3.1 - Системный анализ, управление и обработка информации,  
статистика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Самара - 2024

Работа выполнена на кафедре «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

**Научный консультант:** **Плешивцева Юлия Эдгаровна**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

**Официальные оппоненты:** **Кушников Вадим Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией комплексных научных исследований Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр РАН», г. Саратов

**Французова Галина Александровна**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматике ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

**Чистякова Тамара Балабековна**  
доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой систем автоматизированного проектирования и управления ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», г. Санкт-Петербург

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Защита состоится «12» декабря 2024 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета 24.2.377.02 при ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д.244, Главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу: 443100 г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.02.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.377.02  
к.ф.-м.н., доцент



Саушкин М.Н.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Нефтегазовая промышленность является основным источником образования нефтесодержащих отходов (НСО). С увеличением объемов добычи нефти и природного газа, расширением месторождений, износом систем транспортировки и хранения, усложнением технологий утилизации и обезвреживания растёт негативное влияние НСО на окружающую среду, поэтому требуется принятие срочных мер для повышения энерго- и ресурсосбережения, экологической безопасности при обращении с отходами. В РФ ежегодно в среднем только 30% НСО перерабатываются, остальная часть размещается в хранилищах или сжигается, что усиливает антропогенное воздействие на окружающую среду и приводит к потерям полезных для вторичного использования ценных углеводородов. Указанные причины приводят к насущной необходимости реорганизации (преимущественно на базе российских технологий) сложно-структурированного комплекса переработки (КП) НСО, представляющего совокупность хранилищ отходов и технологических установок для их переработки, с целью минимизации его негативного воздействия на окружающую среду за счёт обеспечения безотходного производства. Эта цель может быть достигнута на основе применения многофакторного анализа и научно-обоснованного выбора технологических решений для переработки отходов, являющихся оптимальными по критериям энерго- и ресурсосбережения, экономической эффективности и экологической безопасности. При этом необходима глубокая фундаментальная проработка всех закономерностей функционирования и взаимосвязей элементов КП НСО, ключевых параметрических характеристик материальных и энергетических потоков, логистических, экологических и технологических факторов, которую можно провести только на основе системных наукоемких подходов с применением современных информационных технологий.

**Степень разработанности темы исследования.** Современные подходы к обращению с НСО базируются на концепциях сокращения и повторного использования отходов предприятий нефтегазовой промышленности, в основу которых положены принципы консервации ресурсов и энергии. Эффективность обращения с НСО в рамках таких концепций может оцениваться через ресурсный потенциал отходов, который зависит не только от состава и «качества» отходов, но и от используемых технологий переработки. Выбор наилучших технологий переработки для реализации ресурсного потенциала НСО, определяющего их

энергетический и материальный потенциал, можно осуществить с помощью различных подходов, которые представлены в работах Мещерякова С.В., Кононенко Е.А., Мазловой Е.А., Пименова А.А., Быкова Д.Е., Ручкиновой О.И., Свергузовой С.В., Минигазимова Н.С., Ибатулина Р.Р., Ягафаровой Г.Г. и др. Предложенные классификации технологий переработки позволяют выбрать наиболее приемлемый с точки зрения простоты и надежности их реализации вариант без качественной и количественной оценки полезного для вторичного использования углеводородного ресурса.

Экономические и экологические подходы к оценке ресурсного потенциала отходов при использовании различных технологий переработки известны по работам J.Y. Park, M.R. Chertow, T.V. Velikanova, I.K. Kiforenko, A.A. Tolstonogov, M.C. Кузнецовой, Н.А. Уваровой, А.А. Пименова, В.В. Ермакова, В.А. Бурлаки, Е.В. Калининой и др. Однако, в этих исследованиях отсутствуют системные подходы к учёту взаимосвязей экологических, экономических, ресурсных, технологических, энергетических факторов при оценке ресурсного потенциала, что снижает объективность оценки эффективности технологий переработки отходов в целом.

Решения в области использования отходов как энергетических ресурсов обычно принимаются на основе метода анализа иерархий Т. Saaty и аналогичных методов (ELECTRE, PROMETHEE, TOPSIS и т.д.), которые отличаются субъективностью определения сравнительных оценок и весовых коэффициентов, назначаемых экспертами. В диссертации используется новый подход к многофакторному анализу в системе переработки НСО на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA), свободного от субъективных оценок экспертов. Метод DEA, широко известный в области многофакторной оценки эффективности производственных и экономических систем по работам Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E., Farrell M.J., Zhu J., Forsund F.R., Кривоножко В.Е., Ратнер С.В., Лычева А.В. и др., для решаемых в диссертации задач применяется впервые.

Учитывая изложенное, актуальной научно-технической задачей является разработка новой методологии системного многофакторного анализа и оптимизации КП НСО, решение которой возможно при одновременном учете разнородных экономических, технологических, энергетических, логистических и экологических факторов, характеризующих организацию и функционирование системы переработки отходов в нефтегазовой промышленности.

**Объектом исследования** является сложно-структурированный комплекс переработки НСО в нефтегазовой промышленности, включающий хранилища отходов и технологические установки для их переработки.

**Целью работы** является разработка теоретических и системно-методических основ для решения актуальных проблем повышения эффективности функционирования КП НСО по комплексным критериям качества в нефтегазовой промышленности. Для достижения указанной цели в диссертации решаются следующие **задачи**:

1. Разработка методики системного анализа и оптимизации комплексной переработки НСО в нефтегазовой промышленности.

2. Разработка и обоснование проблемно-ориентированных моделей для определения оценок эффективности сложно-структурированного комплекса переработки НСО по разнородным технологическим, энергетическим, логистическим и экологическим факторам, характеризующих организацию и функционирование системы переработки отходов в нефтегазовой промышленности.

3. Разработка и обоснование методов и алгоритмов многофакторного анализа системы комплексной переработки НСО в нефтегазовой промышленности с целью выявления ее принципиальных структурных закономерностей, количественного и качественного оценивания основных системных характеристик и свойств.

4. Разработка и обоснование алгоритмов и процедур оптимизации систем комплексной переработки НСО в нефтегазовой промышленности по различным критериям качества.

5. Создание специализированного программного обеспечения для апробации и реализации разработанных методик системного анализа и оптимизационных алгоритмов и процедур для сложно-структурированных систем комплексной переработки НСО в нефтегазовой промышленности.

6. Разработка и обоснование алгоритма выбора и принятия управленческих решений в сложно-структурированной системе переработки НСО в нефтегазовой промышленности.

7. Апробация разработанных методик, методов и алгоритмов, оценка технико-экономической эффективности полученных результатов и разработка рекомендаций по их практическому использованию.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы системного анализа, оптимизации, математического

моделирования, математического программирования, DEA-метод, методы анализа и обработки данных.

**Работа соответствует** предметной области исследования научной специальности 2.3.1 - Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (пункты паспорта специальности 1–5).

**Научная новизна** заключается в разработке и теоретическом обосновании нового подхода к системному многофакторному анализу и оптимизации КП НСО.

В работе получены следующие **научные результаты**, обладающие научной новизной:

- Предложена новая методология решения актуальной проблемы переработки нефтесодержащих отходов, основанная на интеграции методов системного анализа и оптимизации, которая обеспечивает значительное улучшение показателей качества работы промышленных комплексов в нефтегазовой отрасли и снижение их экологического воздействия на окружающую среду.
- Предложена и апробирована не имеющая известных аналогов методика системного анализа и оптимизации комплекса переработки отходов, в котором хранилища НСО и технологии их переработки являются элементами единой системы, определяющими ключевые свойства и структурные закономерности ее функционирования. Методика включает теоретически обоснованные последовательные этапы разработки моделей для определения оценок эффективности, многофакторного анализа, оптимизации и принятия решений, на каждом из которых математический аппарат DEA метода впервые используется в задачах управления переработкой отходов в нефтегазовой промышленности.
- На основе метода DEA разработаны и обоснованы новые модели для определения оценок эффективности сложно-структурированных комплексов переработки НСО, ориентированные на задачи многофакторного анализа и оптимизации. Эти модели, в отличие от известных, позволяют объективно анализировать сложные многостадийные процессы переработки отходов, учитывая многообразные взаимосвязи между технико-экономическими, технологическими, ресурсными, логистическими, энергетическими и экологическими параметрами.
- Разработаны, обоснованы и апробированы новые методы и алгоритмы решения задач многофакторного анализа системы комплексной переработки НСО, которые, в отличие от известных, позволяют качественно и количественно оценить её функциональные и масштабные характеристики на основе ряда ключевых критериев: ресурсной ценности и потенциала, экологической безопасности,

эффективности использования ресурсов и энергии, а также общей эффективности системы.

- Впервые предложен оригинальный подход к оптимизации систем комплексной переработки НСО в нефтегазовой отрасли, в котором комбинация "хранилище-технологическая установка" рассматривается как центральный объект сравнения. Это позволило разработать и теоретически обосновать новые алгоритмы и процедуры решения задач оптимизации, направленные на достижение максимальной эффективности и экологической безопасности технологических процессов переработки отходов.
- Разработано не имеющее известных аналогов специализированное программное обеспечение, включающее библиотеку модулей и оптимизационных процедур, предназначенное для апробации и реализации разработанных методик системного анализа, алгоритмов многофакторного анализа и оптимизации сложно-структурированных систем комплексной переработки НСО нефтегазовой промышленности.
- Впервые разработан и обоснован алгоритм выбора и принятия управленческих решений в сложно-структурированной системе переработки НСО, который, в отличие от известных, позволяет всесторонне анализировать оперативную ситуацию, прогнозировать последствия различных управленческих действий и выбирать оптимальные стратегии управления на основе комплексной оценки текущего состояния производственных процессов и доступных ресурсов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика системного анализа и оптимизации комплекса переработки НСО в нефтегазовой промышленности.
2. Построенные на основе DEA метода проблемно-ориентированные модели для определения оценок эффективности в задачах многофакторного анализа и оптимизации сложно-структурированного комплекса переработки НСО.
3. Методы и алгоритмы решения задач многофакторного анализа сложно-структурированной системы переработки НСО для количественной и качественной оценки ее функциональных и масштабных характеристик.
4. Алгоритмы и процедуры решения задачи оптимизации комплекса переработки НСО по разнородным критериям, обеспечивающим максимальную эффективность и экологическую безопасность процессов переработки отходов.

5. Специализированное программное обеспечение для апробации и реализации разработанных методик системного анализа, методов и алгоритмов многофакторного анализа и оптимизации комплекса переработки НСО в нефтегазовой промышленности.

6. Алгоритм выбора и принятия управленческих решений в сложно-структурированной системе переработки НСО для повышения эффективности управления в нефтегазовой промышленности на оперативном и стратегическом уровнях.

**Теоретическая и практическая значимость.** В диссертации разработан новый подход к системному многофакторному анализу и оптимизации сложно-структурированного комплекса переработки НСО на основе метода DEA, включающий последовательный учёт критериев ресурсного потенциала, ресурсо- и энергосбережения, экологической безопасности и комплексной эффективности на разных стадиях решения соответствующих задач математического программирования. Предлагаемый подход может использоваться для широкого круга задач многофакторного анализа и многокритериальной оптимизации сложных систем, обеспечивая снижение трудоемкости вычислений и позволяя получить результаты в удобной для практического использования форме.

Разработанные методика системного анализа, проблемно-ориентированные модели для определения оценок эффективности, методы, алгоритмы и процедуры многофакторного анализа, оптимизации, выбора и принятия решений, программное обеспечение могут быть использованы отдельно или совместно для решения конкретных задач по переработке нефти, НСО и техногенных отходов, а также по производству дорожного битума, водорода и продуктов на его основе в различных регионах РФ.

**Реализация результатов исследований.** Полученные в работе теоретические положения и практические результаты использованы при выполнении НИР:

- по проектам РФФИ: «Научно-технические основы системного анализа и многокритериальной оптимизации сложно-структурированной системы переработки техногенных отходов нефтеперерабатывающих и нефтегазохимических предприятий» (№20-08-00353, 2020-2022 гг.); «Разработка методов математического моделирования и управления по системным критериям качества тепло- и массообменными процессами в автономных объектах и технологической теплофизике» (№20-08-00240, 2020-2022 гг.);
- в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»:



«Разработка энергосберегающей технологии производства окисленных нефтяных битумов в условиях сонохимической активации» (№14.577.21.0209, 2016-2018 гг.); «Разработка научных основ технологии и конструирования оборудования генерации водорода для производства метановодородной смеси и нужд водородной энергетики» (Соглашение от 02.12.2019 г. № 05.607.21.0311, 2019-2020 гг.);

- в рамках государственного задания Минобрнауки РФ по проекту «Оптимизация по критериям ресурсной ценности, энергосбережения и экологической безопасности организационно-технической системы утилизации отходов нефтегазового комплекса» (№10.3260.2017/ПЧ, 2017-2019 гг.) и при выполнении темы № АААА-А12-2110800012-0 (2022-2024 гг.).

**Внедрение результатов работы.** Разработанные методы и алгоритмы решения задач многофакторного анализа и оптимизации, специализированное программное обеспечение и алгоритм поддержки принятия управленческих решений по переработке НСО внедрены в ООО «Самарская Битумная Компания» (г. Самара), ООО «Экоинтех» (г. Нефтеюганск, ХМАО), ООО «ТрансОйл» (г. Нижний Новгород), ООО «Отрадное» (г. Отрадный, Самарская обл.). Разработанное программное обеспечение и базы данных переданы по 8 лицензионным договорам и используются Институтом проблем управления сложными системами Российской академии наук – обособленным подразделением Федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИПУСС РАН - СамНЦ РАН) и ООО «Технологические покрытия». Материалы диссертационного исследования используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО «СамГТУ» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.04.01 «Оптимизация и интеллектуализация автоматизированных процессов управления в теплоэнергетике и энерготехнологиях». Экономический эффект, подтвержденный актами внедрения, составил 5 млн руб. в год.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов.** Достоверность полученных в диссертации научных результатов обеспечивается корректным применением методов системного анализа, математического моделирования, математического программирования, DEA-метода, методов анализа и обработки данных.

Обоснованность полученных в работе научных результатов и выводов подтверждается анализом технико-экономического эффекта их применения при

выполнении НИР, внедрением и использованием методов и алгоритмов решения задач многофакторного анализа, оптимизации, принятия решений, специализированного программного обеспечения на предприятиях нефтегазовой промышленности и в ИПУСС РАН - СамНЦ РАН, что подтверждается соответствующими актами и лицензионными соглашениями.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: Международная научно-техническая конференция "Автоматизация" (RusAutoCon), (Сочи, 2022 г.); International science and technology conference "Earth science", (Владивосток, 2022 г.); 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (Summa), (Липецк, 2021 г.); International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies (FarEastCon), (Владивосток, 2019-2021 гг.); Международная научная конференция "Математические методы в технике и технологиях" (Казань, 2020 г.); III, IV, V International Scientific and Technical Conference "Energy Systems" (ICES), (Белгород, 2018-2020 г.); XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP-2019), (Самара, 2019 г.); International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES), (Грозный, 2019 г.); Региональная научно-практическая конференция по экологии «Инновации и "зеленые" технологии», (Самара, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (Альметьевск, 2016 г.). В рамках Казанской мультikonференции ММТТ-37 (Казань, 2024 г.) диссертация представлена на заседании квалификационной секции.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 40 печатных работах, из них 9 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК [1–9]; 5 статей в рецензируемых журналах, индексируемых в системах Web of Science и Scopus [10–14], 16 публикаций в других изданиях, сборниках научных трудов, материалов конференций разного уровня [15–30], 7 свидетельств государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных [31–37], 3 учебных пособия.

**Личный вклад автора.** Основные положения и результаты диссертационной работы получены автором лично. Постановка научной проблемы, формулировка и решение задач исследования, непосредственная реализация основной части работ, выполненных в соавторстве, принадлежат автору. В [5; 6; 9; 12–30] автором разработаны методика и алгоритмы многофакторного анализа и оптимизации, осуществлена постановка задач математического программирования, проведено обоснование полученных результатов применительно к рассматриваемой предметной

области. В [4; 7; 8; 10; 11] автором разработаны подходы к системному анализу, реализована методика решения задач исследования. В [31–37] автором разработаны информационная модель баз данных, модули для расчёта оценок эффективности и оптимизации. Работы [1–3] выполнены без соавторов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения, библиографии и 4-х приложений. Общий объем диссертации составляет 300 страниц, включая 73 рисунка и 63 таблицы. Библиографический список включает 171 наименование.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, обоснована научная новизна исследований, представлены выносимые на защиту научные положения, показана практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** проведен системный анализ проблем переработки НСО нефтегазовой промышленности. Рассмотрена классификация НСО по источникам образования; установлено, что 173 вида отходов разнообразного агрегатного состояния (жидкие, пастообразные, суспензии, эмульсии, твердые и др.) относятся к нефтегазовой промышленности, а их компонентный состав и физико-химические характеристики меняются в широких пределах. Поскольку накопление НСО осуществляется в специальных хранилищах (бункерах, амбарах, резервуарах и т.п.) без сортировки, при хранении отходов могут происходить естественные негативные процессы: накопление атмосферных осадков, фазовое разделение, развитие микроорганизмов, окисление и др., что усложняет проблему выбора оптимальной технологии переработки НСО.

В работе предложена классификация методов и технологий переработки НСО, выявлены их системные проблемы: низкая производительность и экологическая опасность, ограниченность и трудоемкость применения, высокие материальные, энергетические и финансовые затраты на реализацию и транспортировку, образование вторичных отходов и др. Для устранения указанных проблем и обеспечения рентабельности применяемых технологий переработки необходимо учитывать множество разнородных, часто конфликтующих друг с другом факторов (экологических, логистических, технических, энергетических и др.).

Приведена содержательная постановка задачи диссертационного исследования. Показано, что, несмотря на существующий научный задел, тема диссертации

разработана недостаточно. Обоснован выбор объекта исследования, представляющего сложно-структурированный КП НСО, который должен рассматриваться как единая система, обладающая основными системообразующими свойствами: целостностью, интегративностью, эмерджентностью, организованностью, функциональностью и синергетическим эффектом от взаимодействия элементов системы.

Цель функционирования рассматриваемого КП НСО заключается в переработке отходов в комплексе хранилищ НСО, в результате которой образуются полезные для дальнейшего использования продукты и непригодные остатки за счёт затрат определенных энергетических, материальных и финансовых ресурсов. Основной задачей управления функционированием КП НСО является обеспечение эффективного, экологически безопасного и экономически целесообразного применения установок переработки отходов с минимизацией их негативного воздействия на окружающую среду и максимально возможным извлечением полезных компонентов.

Под эффективностью процесса переработки в КП НСО везде далее понимается максимально полное и качественное извлечение полезных продуктов из отходов с наименьшими затратами ресурсов при минимально возможном негативном воздействии на окружающую среду. В качестве оценки эффективности (ценности) объектов сравнения (хранилищ НСО или комбинаций «хранилище НСО – технология переработки») в диссертации рассматривается относительный количественный показатель, под которым в самом общем случае понимается отношение взвешенной суммы всех параметров (факторов), определяющих положительные характеристики или результаты функционирования объекта, к взвешенной сумме всех параметров (факторов), представляющих использованные для получения положительных результатов средства и ресурсы. Такой выбор обоснован использованием DEA метода в качестве теоретической основы построения моделей для определения оценок эффективности.

**Во второй главе** представлена научно-обоснованная постановка задачи многофакторного анализа и оптимизации КП НСО, состоящего из двух подсистем: подсистемы размещения (ПР) и подсистемы переработки (ПП), основными элементами которых являются хранилища отходов и технологические установки для их переработки, соответственно (рис. 1).

В соответствии с выявленными характеристиками основных элементов КП НСО разработаны базы данных (БД) хранилищ НСО [34] и технологий переработки [35],

которые обеспечивают систематизированной сбор, обработку и хранение информации.

Разработан и апробирован алгоритм анализа качества информации о НСО и технологиях их комплексной переработки, позволяющий получить обобщенные количественные оценки, которые характеризуют достаточность, актуальность, точность и достоверность анализируемых данных [36]. Дополнительно вычисляется средневзвешенное значение этих параметров, определяющее комплексную количественную оценку релевантности информации, на основе которой принимается решение об уточнении информации в БД.

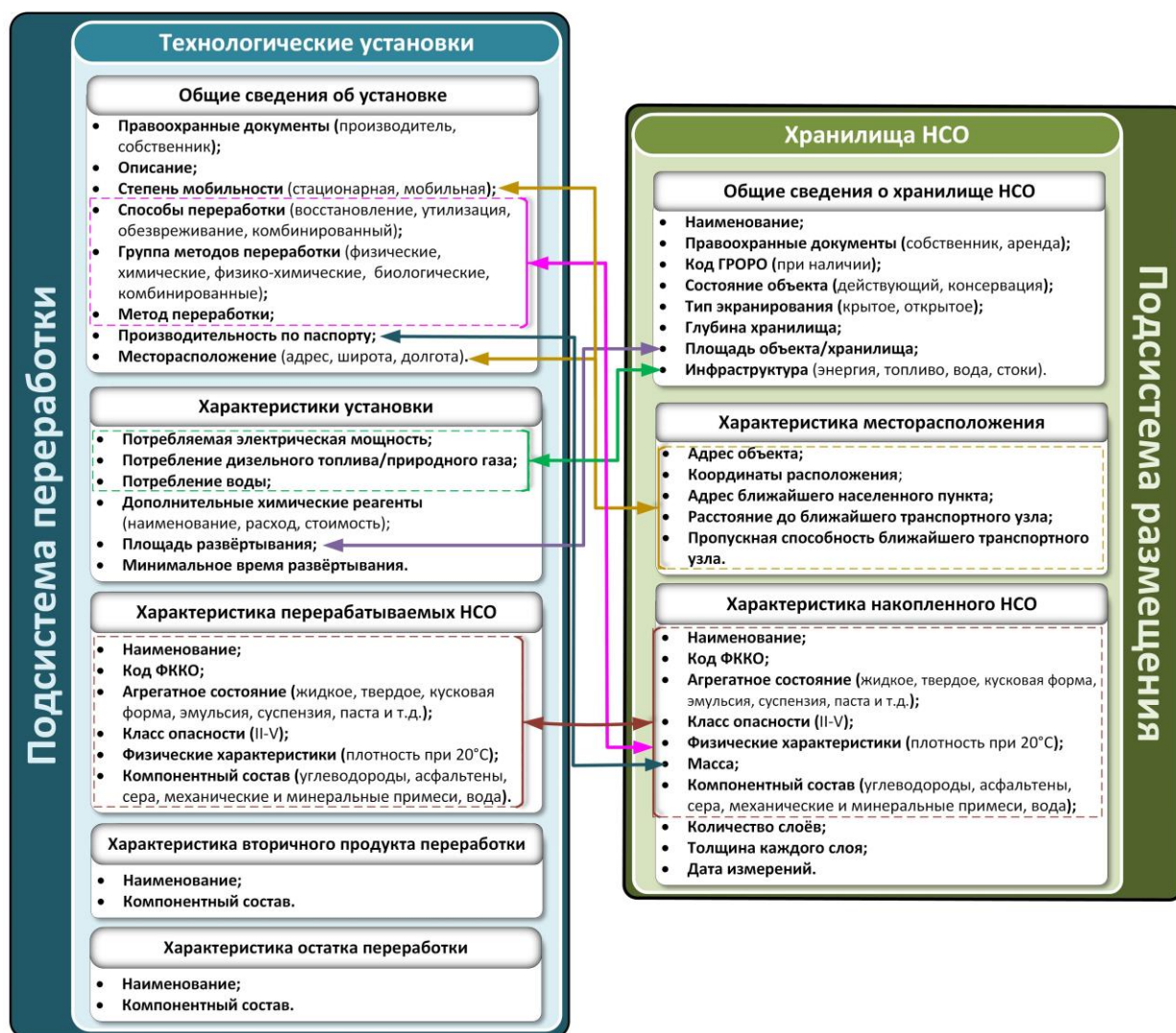


Рис. 1 – Взаимосвязь основных характеристик элементов подсистем КП НСО

На основе проведенного обоснования системных свойств объекта исследования разработана новая методика системного анализа и оптимизации КП НСО в нефтегазовой промышленности (рис. 2), заключающаяся в реализации нижеперечисленных этапов, которые при необходимости повторяются.

1. Анализ структуры и общесистемных свойств КП НСО.

2. Анализ основных элементов подсистем размещения и переработки, выявление их основных характеристик и системных проблем функционирования.
3. Анализ характеристик и связей между элементами подсистем, включающий классификации НСО по источникам образования, методов и технологий переработки НСО (рис. 1).
4. Структуризация и систематизация информации о хранилищах НСО и технологиях переработки отходов, разработка БД, обеспечивающих наиболее рациональный способ обработки информации и её выборки по заданным критериям.
5. Анализ качества информации о хранилищах НСО, их составе и технологиях переработки, основанный на алгоритме, который описан и апробирован в главе 2.
6. Многофакторный анализ КП НСО на основе метода DEA, включающий разработку проблемно-ориентированных моделей для определения оценок эффективности, формулировку задач и разработку алгоритма многофакторного анализа (рис. 3-5), описанного и апробированного в главе 3, а также анализ результатов решения задач в форме ранжированных относительных оценок эффективности и показателей масштабирования.
7. Анализ и систематизация результатов многофакторного анализа, включающая разработку соответствующей БД [32] аналогично базам данных хранилищ НСО и технологий переработки, описанных в главе 2.
8. Оптимизация КП НСО на основе разработанного, апробированного и описанного в главе 4 алгоритма (рис. 8), предполагающего выбор одного из базовых критериев (максимальный ресурсный потенциал, максимальная экологическая безопасность, максимальная ресурсо- и энергоэффективность или максимальная комплексная эффективность) и дополнительных критериев, основных и дополнительных ограничений, постановку и решение соответствующих задач оптимизации с учётом принятых стратегических решений по управлению КП НСО, включая анализ полученных результатов.
9. Определение оценок эффективности КП НСО на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) на основе методики (рис. 9), которая описана и апробирована в главе 4.
10. Выбор и принятие управленческих решений в КП НСО в соответствии с разработанным алгоритмом (рис. 10), позволяющим сформировать локальные управляющие воздействия на систему или обосновать перспективные стратегии управления системой переработки отходов. Система информационной поддержки и принятия управленческих решений (СППР) функционирует в рамках соответствующей экспертной системы (ЭС) (рис. 11), архитектура которой в общем виде представлена в главе 5.

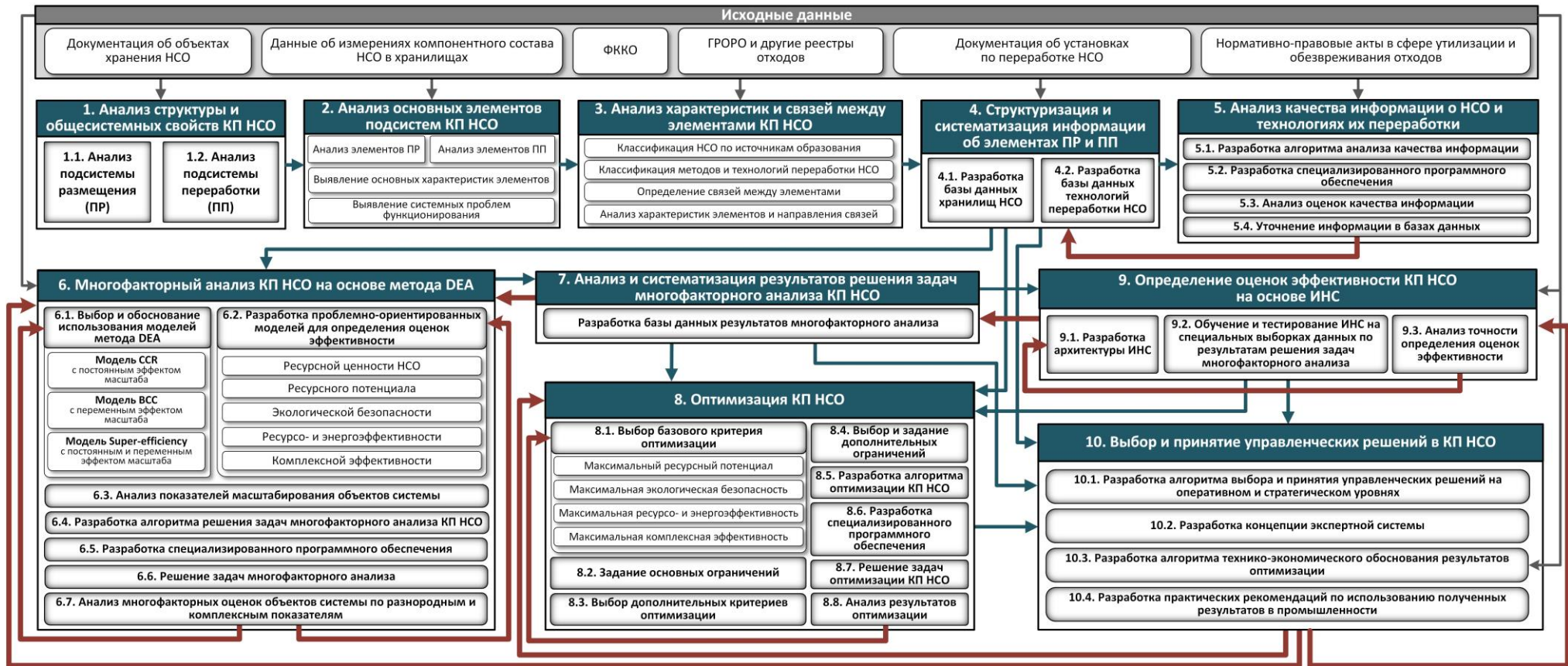


Рис. 2 – Методика системного анализа и оптимизации КП НСО



**В третьей главе** обосновывается использование DEA метода при разработке проблемно-ориентированных моделей для определения оценок эффективности и формулировки задач многофакторного анализа КП НСО, каждая из которых представляет собой задачу математического программирования (ЗМП), позволяющую получить относительные оценки эффективности  $R_j, j = \overline{1, J}$  сравниваемых объектов.

Выбор входных  $X_j = (x_{ij}), i = \overline{1, I}$  и выходных  $Y_j = (y_{gj}), g = \overline{1, G}$  параметров объектов осуществляется с учётом их влияния на оценку эффективности  $R_j, j = \overline{1, J}$  согласно условиям:

$$\frac{\partial R_j}{\partial x_{ij}} < 0, i = \overline{1, I}; \quad (1) \qquad \frac{\partial R_j}{\partial y_{gj}} > 0, g = \overline{1, G}, \quad (2)$$

где  $J$  – число сравниваемых объектов;  $I$  и  $G$  – число входных и выходных параметров, соответственно. В общем случае в качестве векторов входных  $X_j$  и выходных  $Y_j$  параметров могут рассматриваться любые величины, удовлетворяющие условиям (1) и (2), и имеющие различный физический смысл.

Базовая CCR модель метода DEA используется при предположении о пропорциональном изменении выходных параметров  $y_{mj}$  при соответствующем изменении входных параметров  $x_{ij}$ , что характеризует постоянный эффект масштаба, и соответствует ЗМП, сформулированной в общем виде:

$$C_\varphi = \sum_{g=1}^G w_{g\varphi} y_{g\varphi} \rightarrow \max_{W, H} \quad (3)$$

при условиях

$$\sum_{i=1}^I h_{i\varphi} x_{i\varphi} = 1, \quad \sum_{g=1}^G w_{g\varphi} y_{g\varphi} - \sum_{i=1}^I h_{i\varphi} x_{i\varphi} \leq 0, \quad h_{i\varphi} \geq 0, w_{g\varphi} \geq 0, \quad (4)$$

где  $C_\varphi = C_j$  – оценки эффективности  $j$ -го объекта сравнения;  $\varphi = \overline{1, J}$  – индекс целевого объекта сравнения из множества  $J$  объектов, эффективность которого оценивается;  $x_{i\varphi}$  и  $y_{g\varphi}$  – значения входных и выходных параметров для целевого объекта, соответственно;  $H_j = (h_{ij})$  и  $W = (w_{gj})$  – весовые коэффициенты для входных и выходных параметров, соответственно.



*BCC* модель метода DEA используется при предположении о переменном эффекте масштаба, то есть о непропорциональном изменении выходных  $y_{gj}$  и входных  $x_{ij}$  параметров, и соответствующая ЗМП в общем виде имеет вид:

$$B_\varphi = \sum_{g=1}^G q_{g\varphi} y_{g\varphi} - \delta_\varphi \rightarrow \max_{Q, K} \quad (5)$$

при условиях:

$$\sum_{i=1}^I k_{i\varphi} x_{i\varphi} = 1, \sum_{g=1}^G q_{gj} y_{gj} - \sum_{i=1}^I k_{ij} x_{ij} - \delta_j \leq 0, k_{ij} \geq 0, q_{gj} \geq 0, \quad (6)$$

где  $B_\varphi = B_j$  - оценки эффективности  $j$ -го объекта сравнения;  $K_j = (k_{ij})$  и  $Q = (q_{gj})$  - весовые коэффициенты для входных и выходных параметров, соответственно;  $\delta_\varphi = \delta_j$  - свободная переменная, величина или знак которой для  $j$ -го объекта сравнения характеризует тип эффекта масштаба: постоянный ( $\delta_j = 0$ ); убывающий ( $\delta_j < 0$ ); возрастающий ( $\delta_j > 0$ ).

ЗМП (3)-(4) и (5)-(6) решаются  $J$  раз, т.е. для каждого  $j$ -го объекта сравнения отдельно, при этом рассчитываются соответствующие значения оценок  $C_j \in (0, 1]$  и  $B_j \in (0, 1]$ , весовые коэффициенты  $h_{ij}, w_{gj}$  и  $k_{ij}, q_{gj}$ , и переменная  $\delta_j$ . В результате решения ЗМП (3)-(4) или (5)-(6) максимальные оценки эффективности  $C_j = 1$  или  $B_j = 1$  могут получить сразу несколько объектов сравнения. Для точного ранжирования объектов в анализируемой группе используется следующая формулировка ЗМП на основе модели *Super-Efficiency* метода DEA при постоянном эффекте масштаба:

$$SC_\varphi = \sum_{g=1}^G \bar{w}_{g\varphi} y_{g\varphi} \rightarrow \max_{\bar{W}, \bar{H}} \quad (7)$$

при условиях

$$\sum_{i=1}^I \bar{h}_{i\varphi} x_{i\varphi} = 1, \sum_{g=1}^G \bar{w}_{gj} y_{gj} - \sum_{i=1}^I \bar{h}_{ij} x_{ij} \leq 0, \bar{h}_{ij} \geq 0, \bar{w}_{gj} \geq 0, j \neq f, f \in \overline{1, J}, \quad (8)$$

где  $SC_\varphi = SC_j$  - оценки эффективности  $j$ -го объекта сравнения;  $\bar{H}_j = (\bar{h}_{ij})$  и  $\bar{W} = (\bar{w}_{gj})$  - весовые коэффициенты для входных и выходных параметров, соответственно;  $f$  - номер объекта со значением оценки эффективности  $C_f = 1$ ,  $f \in \overline{1, J}$  в анализируемой группе из  $J$  объектов, полученной на основе решения ЗМП (3)-(4), который исключается из ЗМП (7)-(8).

При переменном эффекте масштаба формулируется следующая ЗМП на основе модели *Super-Efficiency*:

$$SB_{\varphi} = \sum_{g=1}^G \bar{q}_{g\varphi} y_{g\varphi} - \delta_{\varphi} \rightarrow \max_{\bar{Q}, \bar{K}} \quad (9)$$

при условиях

$$\sum_{i=1}^I \bar{k}_{i\varphi} x_{i\varphi} = 1, \sum_{g=1}^G \bar{q}_{gj} y_{gj} - \sum_{i=1}^I \bar{k}_{ij} x_{ij} - \delta_j \leq 0, \bar{k}_{ij} \geq 0, \bar{q}_{gj} \geq 0, j \neq z, z \in \overline{1, J}, \quad (10)$$

где  $SB_{\varphi} = SB_j$  - оценки эффективности  $j$ -го объекта сравнения;  $\bar{K}_j = (\bar{k}_{ij})$  и  $\bar{Q} = (\bar{q}_{gj})$  – весовые коэффициенты для входных и выходных параметров, соответственно;  $z$  – номер объекта с оценкой эффективности  $B_z = 1$ ,  $z \in \overline{1, J}$  в анализируемой группе из  $J$  объектов, полученной на основе решения ЗМП (5)-(6), который исключается из ЗМП (9)-(10).

ЗМП (7)-(8), (9)-(10) решаются  $J$  раз, т.е. для каждого  $j$ -го объекта сравнения отдельно, при этом рассчитываются соответствующие значения оценок эффективности  $SC_j$ ,  $SB_j$ , весовых коэффициентов  $\bar{h}_{ij}$ ,  $\bar{w}_{gj}$ ,  $\bar{k}_{ij}$ ,  $\bar{q}_{gj}$  и переменной  $\delta_j$ . Объекты, получившие максимальные оценки  $SC_j \in (0; \infty)$  и  $SB_j \in (0; \infty)$ , являются наилучшими в анализируемой группе из  $J$  объектов сравнения с учётом постоянного и переменного эффектов масштаба, соответственно.

В таблице 1 представлены характеристики разработанных проблемно-ориентированных моделей для определения оценок эффективности, модели метода DEA и обозначения соответствующих ЗМП, физические единицы измерения и обозначения входных и выходных параметров.

В диссертации разработаны методы и алгоритмы решения задач многофакторного анализа сложно-структурированной системы переработки НСО для количественной и качественной оценки её функциональных и масштабных характеристик с использованием разработанных проблемно-ориентированных моделей для определения оценок эффективности.

Таблица 1 – Характеристики проблемно-ориентированных моделей для определения оценок эффективности объектов в КП НСО

<b>1. Анализ ресурсной ценности НСО в хранилищах</b>				
Эффект масштаба, схема расчёта	Постоянный, схемы I и II			
ЗМП	1.1		1.2	
Модель метода DEA	<i>CCR</i> , (3)-(4)		<i>Super-Efficiency</i> , (7)-(8)	
Результат решения ЗМП: Оценки ресурсной ценности НСО	$R_n^1$		$SR_n^1$	
<b>Входные параметры:</b> Средневзвешенное содержание в НСО [% масс.]: $x_{1n}^1$ - асфальтенов и смол; $x_{2n}^1$ - минеральных и механических примесей; $x_{3n}^1$ - серы; $x_{4n}^1$ - воды.		<b>Выходные параметры:</b> $y_{1n}^1$ - средневзвешенное содержание ценных углеводородов [% масс.]; $y_{2n}^1$ - отношение массы ценных углеводородов к массе вредных примесей (вода, асфальтены и смолы, минеральные и механические примеси, сера).		
<b>2. Анализ ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки»</b>				
Эффект масштаба, схема расчёта	Постоянный, схема I		Переменный, схема II	
ЗМП	2.1	2.2	2.3	2.4
Модель метода DEA	<i>CCR</i> , (3)-(4)	<i>Super-Efficiency</i> , (7)-(8)	<i>BCC</i> , (5)-(6)	<i>Super-Efficiency</i> , (9)-(10)
Результат решения ЗМП: Оценки ресурсного потенциала	$CP_p^2$	$SCP_p^2$	$BP_p^2$	$SBP_p^2$
<b>Входные параметры:</b> $x_{1p}^2$ - длительность переработки НСО, включая время разворачивания установки [ч]; $x_{2p}^2$ - масса реагентов [т]; $x_{3p}^2$ - расход топлива (энергии) [т].		<b>Выходные параметры:</b> $y_{1p}^2$ - масса полезных продуктов рециклинга [т]; $y_{2p}^2 = SR_n^1$ .		

3. Анализ экологической безопасности комбинаций «хранилище НСО – технология переработки»				
Эффект масштаба, схема расчёта	Постоянный, схема I		Переменный, схема II	
	3.1	3.2	3.3	3.4
<b>ЗМП</b>				
<b>Модель метода DEA</b>	<i>CCR</i> , (3)-(4)	<i>Super-Efficiency</i> , (7)-(8)	<i>BCC</i> , (5)-(6)	<i>Super-Efficiency</i> , (9)-(10)
<b>Результат решения ЗМП:</b> Оценки экологической безопасности	$CE_p^3$	$SCE_p^3$	$BE_p^3$	$SBE_p^3$
<b>Входные параметры:</b> $x_{1p}^3$ - валовый выброс парниковых газов (углекислого газа и метана) [т]; $x_{2p}^3$ - валовый выброс сернистого ангидрида [т]; $x_{3p}^3$ - валовый выброс в атмосферу сажи [т]; $x_{4p}^3$ - масса образовавшейся золы [т]; $x_{5p}^3$ - масса образовавшейся загрязненной воды [т].			<b>Выходной параметр:</b> $y_{1p}^3 = y_{1p}^2$ .	
4. Анализ ресурсо- и энергоэффективности комбинаций «хранилище НСО – технология переработки»				
Эффект масштаба, схема расчёта	Постоянный, схема I		Переменный, схема II	
	4.1	4.2	4.3	4.4
<b>ЗМП</b>				
<b>Модель метода DEA</b>	<i>CCR</i> , (3)-(4)	<i>Super-Efficiency</i> , (7)-(8)	<i>CCR</i> , (3)-(4)	<i>Super-Efficiency</i> , (7)-(8)
<b>Результат решения ЗМП:</b> Оценки ресурсо- и энергоэффективности	$CN_p^{4\{I\}}$	$SCN_p^{4\{I\}}$	$CN_p^{4\{II\}}$	$SCN_p^{4\{II\}}$
<b>Входные параметры:</b> $x_{1p}^4$ - удельные энергетические затраты на доставку отхода или мобильной установки [руб./т]; $x_{2p}^4$ - время доставки отходов к месту переработки или мобильных установок к хранилищу НСО [ч].	<b>Выходной параметр:</b> $y_{1p}^4 = SCP_p^2$		<b>Выходной параметр:</b> $y_{1p}^4 = SBP_p^2$	

5. Анализ комплексной эффективности комбинаций «хранилище НСО – технология переработки»				
Эффект масштаба, схема расчёта	Постоянный, схема I		Переменный, схема II	
ЗМП	5.1	5.2	5.3	5.4
Модель метода DEA	$CCR,$ (3)-(4)	<i>Super-</i> <i>Efficiency,</i> (7)- (8)	$CCR,$ (3)-(4)	<i>Super-</i> <i>Efficiency,</i> (7)-(8)
Результат решения ЗМП: Оценки комплексной эффективности	$CK_p^{5\{I\}}$	$SCK_p^{5\{I\}}$	$CK_p^{5\{II\}}$	$SCK_p^{5\{II\}}$
<b>Входные параметры:</b> $x_{1p}^5 = x_{1p}^4;$ $x_{2p}^5 = x_{2p}^4.$	<b>Выходные параметры:</b> $y_{1p}^5 = SCP_p^2;$ $y_{2p}^5 = SCE_p^3.$		<b>Выходные параметры:</b> $y_{1p}^5 = SBP_p^2;$ $y_{2p}^5 = SBE_p^3.$	

В качестве методической основы многофакторного анализа КП НСО предлагается последовательное и взаимосвязанное решение ЗМП (табл. 1), в соответствии с разработанным алгоритмом (рис. 3), который включает следующие основные этапы:

1. Сбор и подготовка исходных данных из БД хранилищ НСО и БД технологий переработки (глава 2).

2. Выбор объектов для анализа ( $N$  хранилищ НСО и  $M$  технологий переработки) в БД хранилищ НСО и технологий переработки и составление  $P$  комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» в соответствии с разработанным алгоритмом анализа качества информации (глава 2). Индексация комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» осуществляется следующим образом:

$$p = t + (n - 1) \cdot M, \quad p = \overline{1, P}, \quad (11)$$

где  $t = \overline{1, M}$  – номер технологии переработки,  $n = \overline{1, N}$  – номер хранилища НСО.

3. Выбор проблемно-ориентированных моделей для определения оценок ресурсной ценности НСО в хранилищах, ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности, а также комплексной эффективности комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» (табл. 1).

4. Выбор типа управленческих решений, определяющий схему решения задач многофакторного анализа. Если требуется оперативная переработка НСО во всех

хранилищах и получение максимального объема полезных ресурсов в текущий момент времени, то используется схема I (рис. 4), в которой эффект масштаба принимается постоянным. Схема II применяется для принятия решений на стратегическом уровне (рис. 5), когда требуется учитывать масштабные свойства технологий переработки отходов, что позволяет в перспективе получить максимальный объем полезных для вторичного использования ресурсов с учётом накопления НСО в соответствующих хранилищах, характеризующихся возрастающим эффектом масштаба.

5. Решение соответствующих ЗМП (табл. 1) с помощью разработанного специального программного обеспечения [37] и определение оценок эффективности.

Оценка  $E_j, j = \overline{1, J}$  эффективности масштабирования представляет сравнительную оценку масштаба технологического процесса переработки НСО в анализируемой системе, которая определяется путём сопоставления оценок  $C_j$  и  $B_j$ , полученных при решении ЗМП (3)-(4) и (5)-(6), соответственно:

$$E_j = C_j / B_j, E_j \leq 1. \quad (12)$$

Оценка  $E_j$  может быть получена при анализе ресурсного потенциала и (или) экологической безопасности  $j$ -ой комбинации «хранилище НСО – технология переработки» (п. 2 и 3 табл. 1, соответственно) и использоваться как дополнительный фактор принятия стратегических решений. Если  $E_j = 1$ , то масштаб процесса переработки является оптимальным. При  $B_j = 1$  и  $E_j < 1$  процесс является технически эффективным, но не имеет оптимального масштаба по сравнению с наилучшими объектами в анализируемой системе. Чем меньше оценка  $E_j$ , тем менее эффективным является масштаб процесса, тем большим потенциалом обладает его масштабирование для увеличения эффективности работы всей системы. Чем больше оценка  $E_j$ , тем ближе масштаб процесса к оптимальному.

6. Ранжирование оценок эффективности, включая эффективность масштабирования, и анализ эффекта масштаба для принятия оперативных и стратегических управленческих решений.

7. Передача результатов решения задач многофакторного анализа в разработанную БД [32] для структуризации и систематизации результатов.

Повторение этапов с 3 по 6 алгоритма осуществляется при необходимости решения задач многофакторного анализа для определения всех оценок эффективности объектов КП НСО (табл. 1).

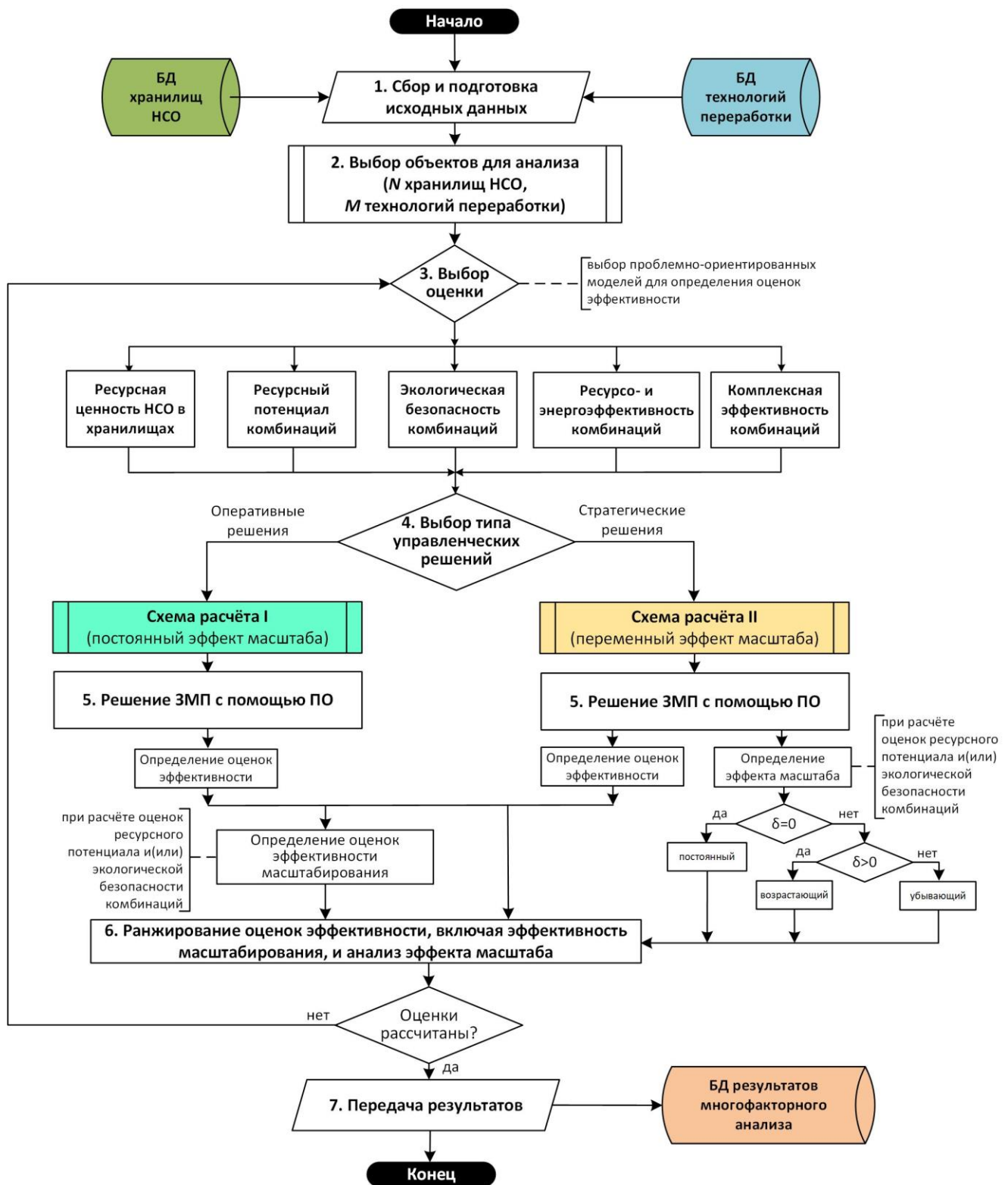


Рис. 3 – Алгоритм решения задач многофакторного анализа КП НСО

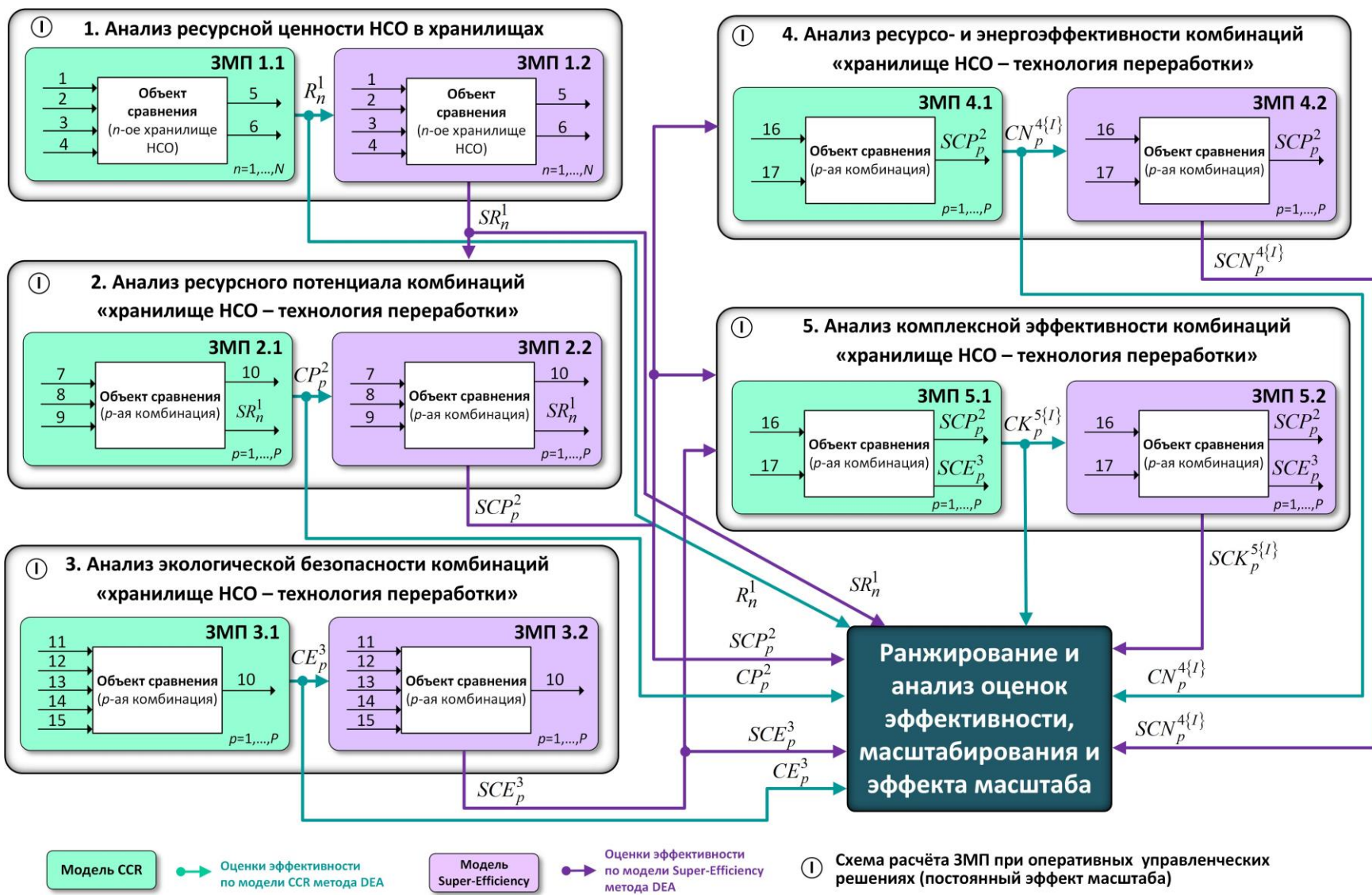


Рис. 4 – Схема I для решения задач многофакторного анализа (оперативные решения):

1-6 – входные и выходные параметры ЗМП 1.1 и 1.2; 7-10 – входные и выходные параметры ЗМП 2.1 и 2.2;

11-15 – входные параметры ЗМП 3.1 и 3.2; 16-17 – входные параметры ЗМП 4.1, 4.2, 5.1, 5.2.



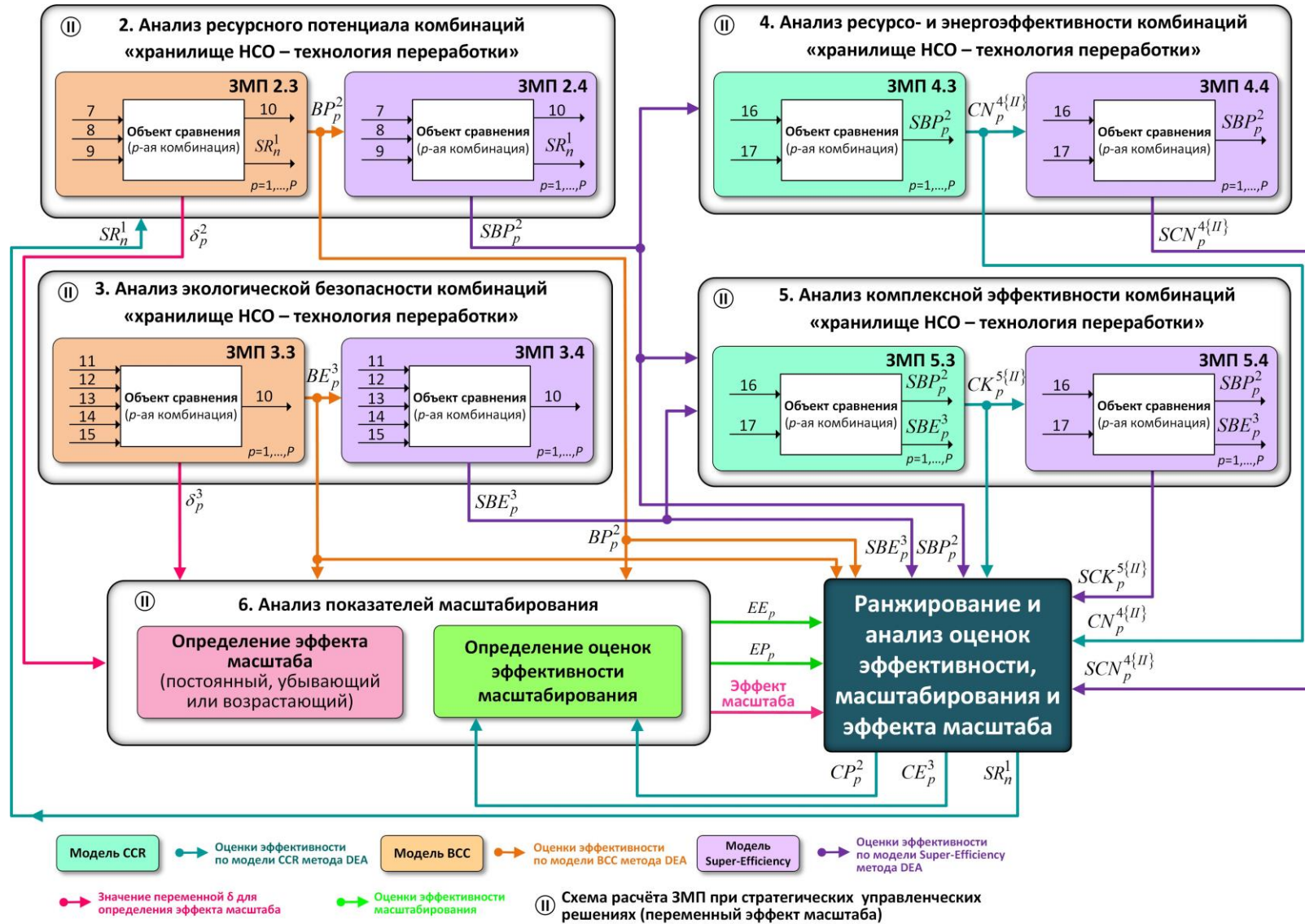


Рис. 5 – Схема II для решения задач многофакторного анализа (стратегические решения):

1-17 – обозначения входных и выходных параметров ЗМП аналогично рис. 4.

Разработанный алгоритм апробирован на примере задачи многофакторного анализа КП НСО, который включает расположенные в пределах одного региона  $N=90$  хранилищ НСО различного вида и  $M=14$  установок переработки НСО. Общая масса НСО в хранилищах составляет 191,1 тыс. т. Общее число возможных комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» в рассматриваемой системе составляет  $P=1260$ . Представленные на рис. 6 (схема I) и рис. 7 (схема II) ранжированные оценки эффективности по различным критериям позволяют принимать локальные управленческие решения по выбору наилучших технологий для переработки НСО в хранилищах.

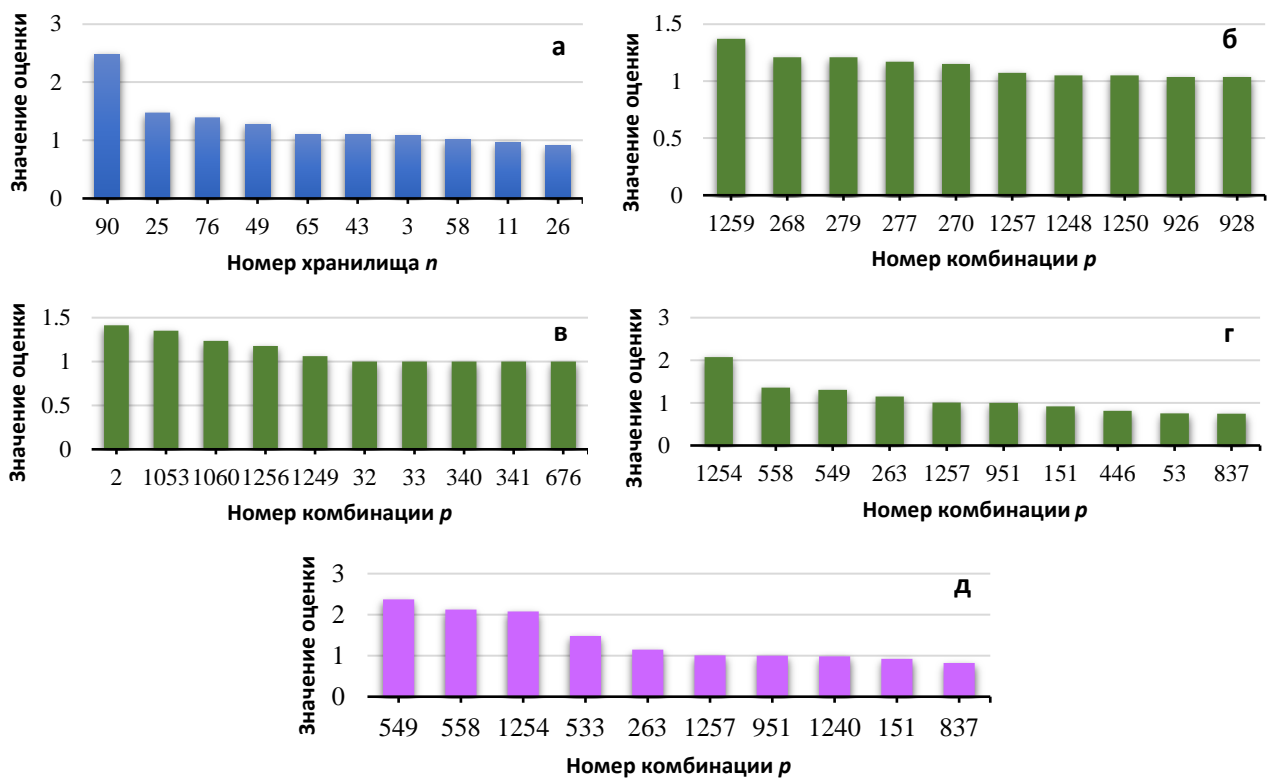


Рис. 6 – Оценки эффективности лучших объектов сравнения в КП НСО (схема I):  
**а** - ресурсной ценности НСО в хранилищах ( $SR_n^1$ ); **б** - ресурсного потенциала комбинаций ( $SCP_p^2$ ); **в** - экологической безопасности комбинаций ( $SCE_p^3$ );  
**г** - ресурсо- и энергоэффективности комбинаций ( $SCN_p^{4{I}}$ ); **д** - комплексной эффективности комбинаций ( $SCK_p^{5{I}}$ )

Анализ полученных результатов показывает (рис. 6, д и рис. 7, г), что доля комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с максимальными оценками  $SCK_p^{5{I}}$ ,  $SCK_p^{5{II}}$  комплексной эффективности при постоянном эффекте масштаба (схема I) составляет 0,48%, а при переменном (схема II) – 0,56%, что

свидетельствует о наличии эффективных технологий переработки в системе. Большая доля неэффективных или мало эффективных комбинаций с оценками в диапазоне от 0 до 0,21 при постоянном (86,03%) и переменном (96,12%) эффектах масштаба обуславливает необходимость решения оптимизационных задач по соответствующим критериям эффективности с учётом существующих и заданных ограничений.

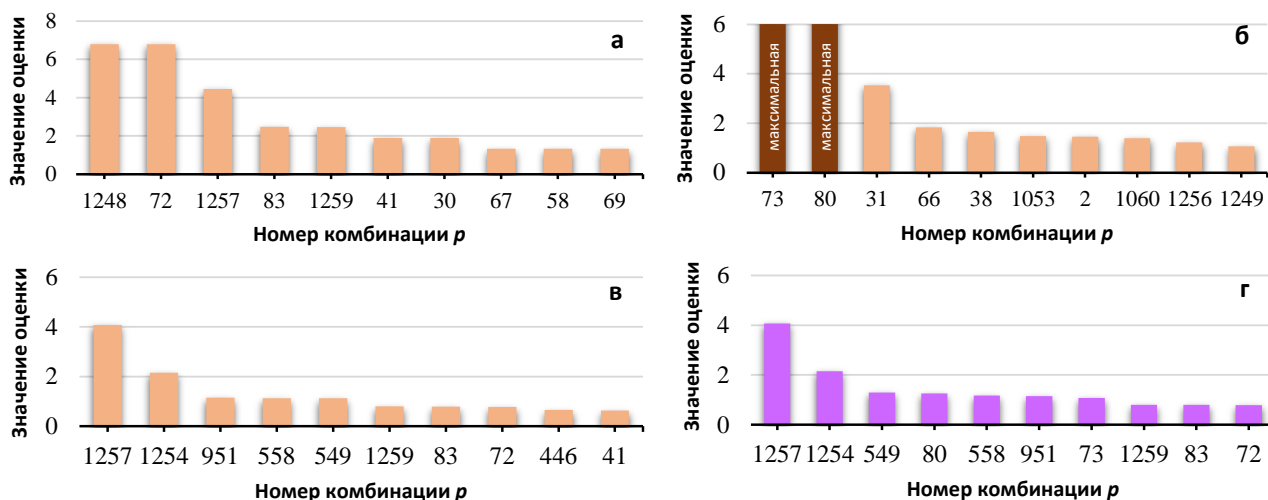


Рис. 7 – Оценки эффективности лучших объектов сравнения в КП НСО (схема II):  
**а** - ресурсного потенциала комбинаций ( $SBP_p^2$ ); **б** - экологической безопасности комбинаций ( $SBE_p^3$ ); **в** - ресурсо- и энергоэффективности комбинаций ( $SCN_p^{4\{II\}}$ );  
**г** - комплексной эффективности комбинаций ( $SCK_p^{5\{II\}}$ )

**В четвёртой главе** рассматриваются алгоритмы и процедуры решения задачи оптимизации КП НСО, обеспечивающие максимальную эффективность технологических процессов переработки отходов по разнородным критериям. Для формирования базового критерия оптимизации набор оценок эффективности комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» по каждому критерию эффективности представляется в виде матрицы  $W$  размерностью  $N \times M$ :

$$W = \{W_{nm}^i\}, i = \overline{1,4}, n = \overline{1,N}, m = \overline{1,M}, \quad (13)$$

где  $W_{nm}^i$  – оценки эффективности переработки НСО, полученные в ходе решения задач многофакторного анализа (глава 3), определяющие один из базовых критериев оптимизации: ресурсного потенциала  $W_{nm}^1 = SCP_{nm}^2$  или  $W_{nm}^1 = SBP_{nm}^2$ , экологической безопасности  $W_{nm}^2 = SCE_{nm}^3$  или  $W_{nm}^2 = SBE_{nm}^3$ , ресурсо- и энергоэффективности

$W_{nm}^3 = SCN_{nm}^{4\{I\}}$  или  $W_{nm}^3 = SCN_{nm}^{4\{II\}}$ , комплексной эффективности переработки  $W_{nm}^4 = SCK_{nm}^{5\{I\}}$  или  $W_{nm}^4 = SCK_{nm}^{5\{II\}}$  (в зависимости от схемы расчёта многофакторной оценки **I** (рис. 4) или **II** (рис. 5), соответственно, и с учётом сопоставления индексов согласно (11)).

Результаты расчета длительностей переработки  $x_{1p}^2, p = \overline{1, P}$  (ЗМП 2.1-2.4) могут быть представлены в виде матрицы  $\tilde{T}$  размерностью  $N \times M$ , где строки матрицы содержат длительности работы всех  $M$  технологических установок для каждого  $n$ -го из  $N$  хранилищ НСО, а столбцы матрицы содержат длительности работы каждой  $m$ -ой из  $M$  технологических установок для переработки НСО во всех  $N$  хранилищах:

$$\tilde{T} = \{x_{1nm}^2\}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}. \quad (14)$$

Аналогично могут быть представлены в виде матриц размерностью  $N \times M$  следующие характеристики КП НСО:

- общие затраты на переработку отходов, включающие стоимость реагентов  $l_{nm}^1$ , стоимость энергетических затрат на работу установки  $l_{nm}^2$  и на доставку отходов к месту переработки или мобильной установки к месту хранения отходов  $l_{nm}^3$ , заработную плату персонала, отчисления в страховые фонды и другие аналогичные расходы  $l_{nm}^4$ , в виде матрицы  $\tilde{L}$ :

$$\tilde{L} = \left\{ \sum_{\xi=1}^4 l_{nm}^{\xi} \right\}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}; \quad (15)$$

- масса полезных продуктов рециклинга  $y_{1p}^2, p = \overline{1, P}$  (ЗМП 2.1–2.4) в виде матрицы  $\tilde{R}$ :

$$\tilde{R} = \{y_{1nm}^2\}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}; \quad (16)$$

- объем выброса парниковых газов  $x_{1p}^3, p = \overline{1, P}$  (ЗМП 3.1–3.4) в виде матрицы  $\tilde{D}^1$ :

$$\tilde{D}^1 = \{x_{1nm}^3\}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}. \quad (17)$$

Аналогично (17) в матричной форме могут быть представлены следующие экологические параметры: объем выброса сернистого ангидрида  $\tilde{D}^2 = \{x_{2nm}^3\}$ , выброс в атмосферу сажи  $\tilde{D}^3 = \{x_{3nm}^3\}$ , масса образовавшейся золы  $\tilde{D}^4 = \{x_{4nm}^3\}$  и

загрязненной воды  $\tilde{D}^5 = \{x_{5nm}^3\}$ . На основе матриц (14) – (17) формулируются наборы ограничений оптимизационной задачи.

В качестве целевой функции  $\alpha$  для решения задачи оптимизации предлагается рассмотреть сумму произведений оценок эффективности  $W_{nm}^i$  и значений параметров  $\lambda_{nm}$ , которая характеризует суммарную эффективность всех возможных комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» в КП НСО по рассматриваемому критерию согласно (13):

$$\alpha = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M W_{nm}^i \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \max, \quad (18)$$

где  $\lambda_{nm} = 1$  означает выбор  $m$ -ой технологии для переработки НСО в  $n$ -ом хранилище, в противном случае  $\lambda_{nm} = 0$ .

Задача оптимизации системы переработки НСО может быть сформулирована в виде целочисленной задачи линейного программирования (ЦЗЛП), в которой требуется найти набор наилучших комбинаций «хранилище НСО – технология переработки»  $W_{nm}^i$  в виде матрицы:

$$A = \{\lambda_{nm}\}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M} \quad (19)$$

обеспечивающий максимум целевой функции (18), формируемой на множестве значений оценок эффективности (13).

Задачу оптимизации целесообразно формулировать в условиях основных ограничений:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \lambda_{nm} = N, \quad (20) \quad \sum_{m=1}^M \lambda_{nm} = 1, n = \overline{1, N}. \quad (21)$$

Ограничение (20) означает, что гарантируется переработка отходов, размещенных во всех  $N$  хранилищах анализируемой системы. Ограничение (21) формулируется из предположения, что для любого из  $N$  хранилищ будет выбрана лишь одна технологическая установка для переработки хранящихся в нем отходов. Дополнительные ограничения могут формулироваться в зависимости от дополнительных требований, предъявляемых в процессе функционирования КП НСО (табл. 2).

Таблица 2 – Дополнительные ограничения в задаче оптимизации КП НСО

Ограничение на	Формулировка ограничения для	
	<i>m</i> -ой установки (технологии)	<i>M</i> установок (технологий)
Длительность переработки	$\sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot \lambda_{nm} \leq b_m, \quad (22)$ <p>где <math>b_m</math> - заданная максимальная длительность переработки.</p>	$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot \lambda_{nm} \leq \tilde{B}, \quad (23)$ <p>где <math>\tilde{B}</math> - заданная общая длительность переработки.</p>
Загрязнения на переработку	$\sum_{n=1}^N l_{nm} \cdot \lambda_{nm} \leq c_m, \quad (24)$ <p>где <math>c_m</math> - заданная максимальная стоимость переработки.</p>	$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N l_{nm} \cdot \lambda_{nm} \leq CT, \quad (25)$ <p>где <math>CT</math> - заданная общая стоимость переработки.</p>
Минимальную массу полезных продуктов рециклинга	$\sum_{n=1}^N r_{nm} \cdot \lambda_{nm} \geq u_m, \quad (26)$ <p>где <math>u_m</math> - заданная минимальная масса полезных продуктов.</p>	$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N r_{nm} \cdot \lambda_{nm} \geq U, \quad (27)$ <p>где <math>U</math> - заданная минимальная общая масса полезных продуктов.</p>
Объем вредных веществ, образующихся в процессе переработки	$\sum_{n=1}^N d_{nm}^g \cdot \lambda_{nm} \leq ef_m^g, \quad (28)$ <p>где <math>ef_m^g</math> - заданный максимальный объем <math>g</math>-го вредного вещества, образующегося при переработки НСО; <math>g = \overline{1,5}</math> - индекс вредного вещества (1- парниковые газы, 2- сернистый ангидрид, 3 - сажа, 4 - зола, 5 - загрязнённая вода).</p>	$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N d_{nm}^g \cdot \lambda_{nm} \leq Ef^g, \quad (29)$ <p>где <math>Ef^g</math> - заданный общий объем <math>g</math>-го вредного вещества, образующегося в процессе переработки.</p>

При постановке задачи многокритериальной оптимизации дополнительные ограничения (22)-(29) могут быть преобразованы в дополнительные критерии оптимизации (табл. 3). В таком случае задача многокритериальной оптимизации КП НСО формулируется как задача достижения максимума целевой функции (18) при минимальном для критериев (30), (32), (36) и(или) максимальном для критерия (34) значениях для каждой *m*-ой установки (технологии) отдельно, либо для критериев (31), (33), (37) и(или) для критерия (35) для всех *M* технологических установок переработки НСО в системе, соответственно.

Таблица 3 – Дополнительные критерии в задаче оптимизации КП НСО

Критерий	Формулировка критерия оптимизации для	
	<i>m</i> -ой установки (технологии)	<i>M</i> установок (технологий)
Быстродействие	$\beta_m = \sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \min (30)$	$\beta_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \min (31)$
Минимальные затраты на переработку	$\chi_m = \sum_{n=1}^N l_{nm} \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \min (32)$	$\chi_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N l_{nm} \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \min (33)$
Максимальная ресурсная продуктивность	$\gamma_m = \sum_{n=1}^N r_{nm} \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \max (34)$	$\gamma_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N r_{nm} \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \max (35)$
Минимальный объем вредных веществ	$\eta_m^g = \sum_{n=1}^N d_{nm}^g \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \min (36)$	$\eta_{\Sigma}^g = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N d_{nm}^g \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \min (37)$

Для решения сформулированной ЦЗЛП разработан алгоритм (рис. 8), реализация которого включает следующие этапы:

1. Сбор и подготовка исходных данных осуществляется на основе информации из БД технологий переработки и хранилищ НСО (этап 4, рис. 2), оценок эффективности комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» (этап 7, рис. 2) с учётом постоянного и переменного эффектов масштаба.

2. Формируются матрицы оценок  $W$  в форме (13) и матрицы основных параметров  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{L}$ ,  $\tilde{R}$ ,  $\tilde{D}^g$  в форме (14)-(17), соответственно.

3. Выбирается уровень управленческих решений (оперативный или стратегический) и, в соответствии с этим, применяются оценки эффективности с учётом постоянного или переменного эффекта масштаба.

4. Осуществляется выбор одного из следующих базовых критериев оптимизации: максимальный ресурсный потенциал, максимальная экологическая безопасность, максимальная ресурсо- и энергоэффективность или максимальная комплексная эффективность. При этом в целевой функции (18) используется соответствующая базовому критерию матрица  $W$  (13) с оценками эффективности, полученными в результате решения задач многофакторного анализа с учётом эффекта масштаба, выбранного на этапе 3.

5. Выбор дополнительного(ых) критерия(ев) оптимизации осуществляется при необходимости по следующим правилам: при максимальном ресурсном потенциале могут дополнительно быть выбраны критерии 1 и(или) 3; при максимальной экологической безопасности – критерии 1, 3-8; при максимальной ресурсо- и



энергоэффективности – критерии 1-3; при максимальной комплексной эффективности - критерии 1-8 (рис. 8).

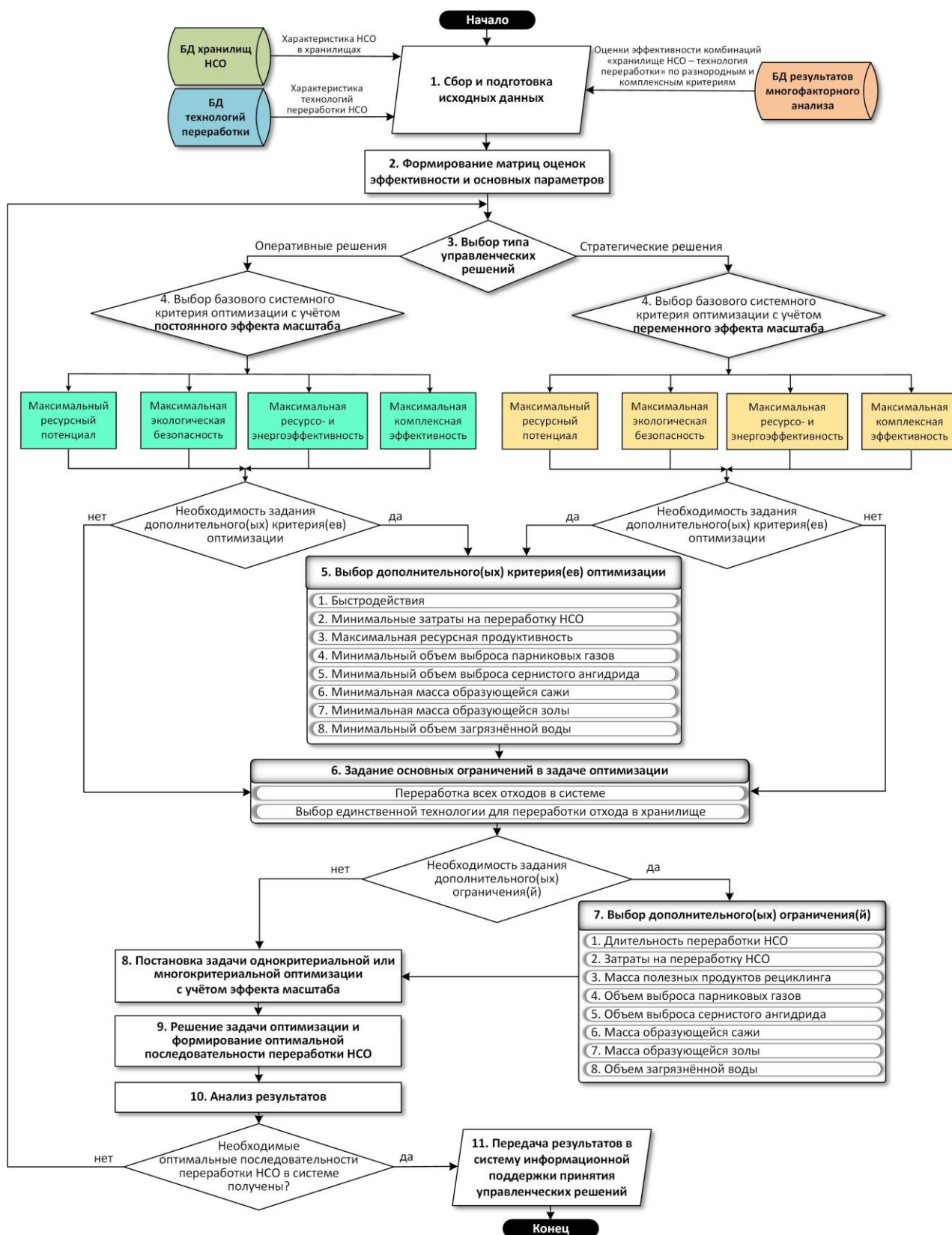


Рис. 8 – Алгоритм решения задачи оптимизации КП НСО



6. Основные ограничения задаются в форме (20) для переработки всех отходов в системе и в форме (21) для подбора единственной  $m$ -ой технологии для переработки отхода в  $n$ -ом хранилище НСО.

7. Выбор дополнительных ограничений производится при отсутствии противоречий дополнительному(ым) критерию(ям), выбранному(ым) на 5 этапе. Если необходимость в дополнительных ограничениях отсутствует, то этап пропускается.

8. Задача однокритериальной или многокритериальной оптимизации по выбранному на этапе 4 базовому критерию с учётом основных ограничений (этап 6) формулируется в зависимости от выбранных дополнительных критериев оптимизации (этап 5) и дополнительных ограничений (этап 7).

9. Решение задачи оптимизации осуществляется с помощью разработанного специального программного обеспечения [31; 33] с использованием процедур и функций ПО MATLAB (глава 4), предназначенных для решения ЦЗЛП.

10. Проводится анализ полученных результатов оптимизации. При необходимости изменения базового критерия оптимизации этапы алгоритма с 3-го по 10-й повторяются.

11. Передача результатов в СППР осуществляется в случае, если необходимые оптимальные последовательности переработки НСО в системе определены.

В рамках апробации алгоритма решения задачи оптимизации сформулированы и решены: задачи оптимизации по критерию максимальной комплексной эффективности с учётом постоянного (табл. 4) и переменного эффектов масштаба (табл. 5) для переработки НСО в  $N=90$  хранилищах; задача многокритериальной оптимизации по базовому критерию максимальной комплексной эффективности и дополнительному критерию быстродействия на примере КП НСО, включающего 16 хранилищ НСО и 5 технологических установок.

Сравнительный анализ результатов решения задачи однокритериальной оптимизации по двум представленным наборам технологий (табл. 4 и 5) показал, что наибольшую массу полезных продуктов можно получить, используя стратегический подход к управлению системой комплексной переработки НСО с переменным эффектом масштаба: 20622,8 т. против 15213,1 т. в операционном подходе с постоянным эффектом масштаба. Однако, по ряду других технологических параметров в краткосрочной перспективе операционный подход лучше стратегического: длительность переработки меньше на 2581,49 ч., масса используемых реагентов меньше на 5110,26 т., выбросы сернистого ангидрида и сажи в атмосферу меньше на 773,78 т. и 2102,66 т., соответственно, и др. Анализ результатов решения задачи многокритериальной оптимизации показал, что наилучшая

последовательность комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» обеспечивает минимальное время переработки отходов (3603,18 ч) при максимальной суммарной комплексной эффективности (10,17).

Если на основе полученных результатов решения оптимизационных задач однозначный выбор комбинаций «хранилище НСО – технологическая установка» и последовательности переработки неочевиден, необходимо использовать разработанный алгоритм выбора и принятия управленческих решений (глава 5) в составе предлагаемой ЭС.

Для упрощения вычислительных процедур решения задач многофакторного анализа в диссертации предлагается методика определения оценок эффективности с использованием ИНС типа персептрон (рис. 9). Обучение ИНС проводится методом обратного распространения ошибки. Построение, обучение и тестирование ИНС проводится с использованием свободного ПО Neuroph Studio.



Рис. 9 - Методика определения оценок эффективности КП НСО на основе ИНС

Предложенная методика является универсальной в рамках разработанного подхода и может быть распространена на получение оценок ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности, комплексной эффективности комбинаций «хранилище НСО – технология переработки».

Таблица 4 – Результаты решения задачи оптимизации КП НСО по базовому критерию максимальной комплексной эффективности с учётом постоянного эффекта масштаба

Наименование	Параметры переработки											Оценка комплексной эффективности	
	Длительность переработки, [ч]	Масса реагентов, [г]	Расход топлива (энергии), [г]	Выбросы парниковых газов, [г]	Выбросы сернистого ангидрида, [г]	Выбросы в атмосферу сажи, [г]	Масса образовавшейся золы, [г]	Масса образовавшейся загрязненной воды, [г]	Удельные энергетические затраты на доставку, [руб./г]	Длительность доставки отходов или технологий, [ч]	Масса полезных продуктов рециклинга (углеводороды), [г]		
Обозначение (табл.1)	$x_{1p}^2$	$x_{2p}^2$	$x_{3p}^2$	$x_{1p}^3$	$x_{2p}^3$	$x_{3p}^3$	$x_{4p}^3$	$x_{5p}^3$	$x_{1p}^4$	$x_{2p}^4$	$y_{1p}^2$	$SCK_p^{5\{I\}}$	
<i>Статистические данные</i>													
Минимальное значение	12,68	0	0,01	0,14	34,66	0	0	17,76	10,09	2,83	6,40	<b>0,103</b>	
Максимальное значение	20363	584,83	30,29	1,34	4186,46	44,37	113,09	2571,09	7502,81	1508,13	1734,73	<b>2,371</b>	
Среднее значение	457,30	44,68	1,29	0,50	684,23	5,42	8,76	265,38	1381,3	35,67	169,03	<b>0,477</b>	
Стандартное отклонение	2205,33	77,39	4,06	0,21	604,25	9,84	20,94	336,02	1495,05	165,19	218,27	<b>0,360</b>	
<b>Суммарные данные</b>	<b>41157</b>	<b>4021,3</b>	<b>116,2</b>	<b>61580,4</b>	<b>488,2</b>	<b>788,2</b>	<b>23884,3</b>	<b>71585,9</b>	<b>1381,3*</b>	<b>3210,4</b>	<b>15213,1</b>	<b>42,975</b>	
Номер технологии <i>m</i>	Количество хранилищ НСО	<i>Суммарные данные по технологиям</i>											
<b>1</b>	5	693	171,9	51,6	2842,4	1,5	26,2	991,5	8104,8	326,9*	43,0	1771,0	<b>3,511</b>
<b>3</b>	1	5459,7	0	1,4	131,6	0	1,3	144,9	1196,9	14,8*	71,1	281,3	<b>2,371</b>
<b>8</b>	3	22041,7	0	32,8	4377,3	0	0	2763,5	1378,3	28,3*	2021,5	2069,3	<b>3,725</b>
<b>11</b>	51	10944,9	3829,3	8,2	33511,1	0,02	33,51	14214,7	50649,4	2176,7*	712,4	4404,8	<b>20,883</b>
<b>12</b>	20	1666,1	18,4	17,7	14464,2	276,44	131,50	4003,49	8916,47	380,8*	177,5	4141,2	<b>7,657</b>
<b>13</b>	10	351,6	1,7	4,5	6253,8	210,24	595,60	1766,23	1340,04	396*	185	2545,6	<b>4,827</b>

\* - представлены средние данные по параметру.

Таблица 5 – Результаты решения задачи оптимизации КП НСО по базовому критерию максимальной комплексной эффективности с учётом переменного эффекта масштаба

Наименование	Параметры переработки											Оценка комплексной эффективности	
	Длительность переработки, [ч]	Масса реагентов, [г]	Расход топлива (энергии), [г]	Выбросы парниковых газов, [г]	Выбросы сернистого ангидрида, [г]	Выбросы в атмосферу сажи, [г]	Масса образовавшейся золы, [г]	Масса образовавшейся загрязненной воды, [г]	Удельные энергетические затраты на доставку, [руб./г]	Длительность доставки отходов или технологий, [ч]	Масса полезных продуктов рециклинга (углеводороды), [г]		
Обозначение (табл.1)	$x_{1p}^2$	$x_{2p}^2$	$x_{3p}^2$	$x_{1p}^3$	$x_{2p}^3$	$x_{3p}^3$	$x_{4p}^3$	$x_{5p}^3$	$x_{1p}^4$	$x_{2p}^4$	$y_{1p}^2$	$SCK_p^{5\{II\}}$	
<i>Статистические данные</i>													
Минимальное значение	3,52	0	0,04	0,06	0	0	0	17,76	10,09	4,13	14,11	<b>0,0233</b>	
Максимальное значение	16969,3	7636,20	19,00	4,44	4395,74	90,35	418,65	2571,09	7485,23	2445,07	1789,38	<b>4,0754</b>	
Среднее значение	485,98	101,46	0,99	0,59	652,17	14,02	32,12	265,38	779,85	104,08	229,14	<b>0,2637</b>	
Стандартное отклонение	2278,44	804,31	2,30	0,49	529,63	15,58	52,77	336,02	961,32	315,82	223,33	<b>0,4676</b>	
<b>Суммарные данные</b>	<b>43738,5</b>	<b>9131,5</b>	<b>89,0</b>	<b>58695,0</b>	<b>1262,0</b>	<b>2890,8</b>	<b>23884,3</b>	<b>63890,5</b>	<b>779,9*</b>	<b>9367,5</b>	<b>20622,8</b>	<b>23,738</b>	
Номер технологии <i>m</i>	Количество хранилищ НСО	<i>Суммарные данные по технологиям</i>											
<b>2</b>	5	188,3	0	8,2	2543,6	1,7	23,5	1492,9	8418,7	205,9*	1659,6	1672,9	<b>1,228</b>
<b>3</b>	1	5459,7	0	1,4	131,6	0	1,3	144,9	1196,9	14,8*	71,1	281,3	<b>1,294</b>
<b>8</b>	3	13732	0	20,4	1167,2	0	0	1902,8	1192,4	30,8*	3991,7	551,8	<b>1,325</b>
<b>10</b>	1	16969,3	7636,2	11,1	0	0	0	2571,1	18027,4	477,0*	60,9	864,9	<b>1,258</b>
<b>11</b>	19	4194	1469,2	3,2	12463,8	0	12,5	5720,3	19247,3	1503,6*	195,3	1656,6	<b>6,682</b>
<b>12</b>	20	1626,2	17,9	17,2	13738,0	271,7	124,9	3898,8	8813,8	380,2*	177,4	3933,2	<b>3,767</b>
<b>13</b>	34	1352,2	6,7	18,0	23487,4	836,7	2236,9	6575,0	5977,5	900,1*	1082,3	9560,3	<b>7,206</b>
<b>14</b>	7	216,8	1,4	9,5	5163,3	151,8	491,7	1578,5	1016,5	256,9*	2129,2	2101,8	<b>0,979</b>

\* - представлены средние данные по параметру.

**В пятой главе** приведено описание разработанного алгоритма выбора и принятия управленческих решений в сложно-структурированной системе переработки НСО для повышения эффективности управления в нефтегазовой промышленности на оперативном и стратегическом уровнях (рис. 10).

На первом этапе осуществляется сбор и подготовка исходной информации, содержащейся в БД хранилищ НСО, технологий переработки и результатов многофакторного анализа.

На втором этапе осуществляется выбор одной из трёх целей управления последовательностью переработки в КП НСО, что приводит к выполнению алгоритма по одной из трёх его ветвей (**А**, **Б** или **В**).

***А. Определение последовательности переработки на основе ранжирования установок в зависимости от их базовых характеристик.***

А.1 Выбор базовой характеристики технологической установки: производительность или удельная стоимость переработки (включая расходы на топливо (энергию), заработную плату, реагенты, доставку установок или отходов).

А.2 Выбор установки с максимальной производительностью или минимальной стоимостью переработки, при этом предполагается последовательная переработка НСО во всех хранилищах на основе одной выбранной технологии.

А.3 Определение последовательности переработки НСО в хранилищах на основе логистических факторов.

***Б. Определение последовательности переработки на основе ранжированных многофакторных оценок эффективности НСО в хранилищах и комбинаций «хранилище НСО – технология переработки».***

Б.1 Выбор одной из оценок эффективности для принятия решений, определяемой по результатам решения задач многофакторного анализа по разнородным и комплексным критериям (глава 3).

Б.2 Ранжирование хранилищ НСО или комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» в зависимости от выбранной на шаге Б1 оценки.

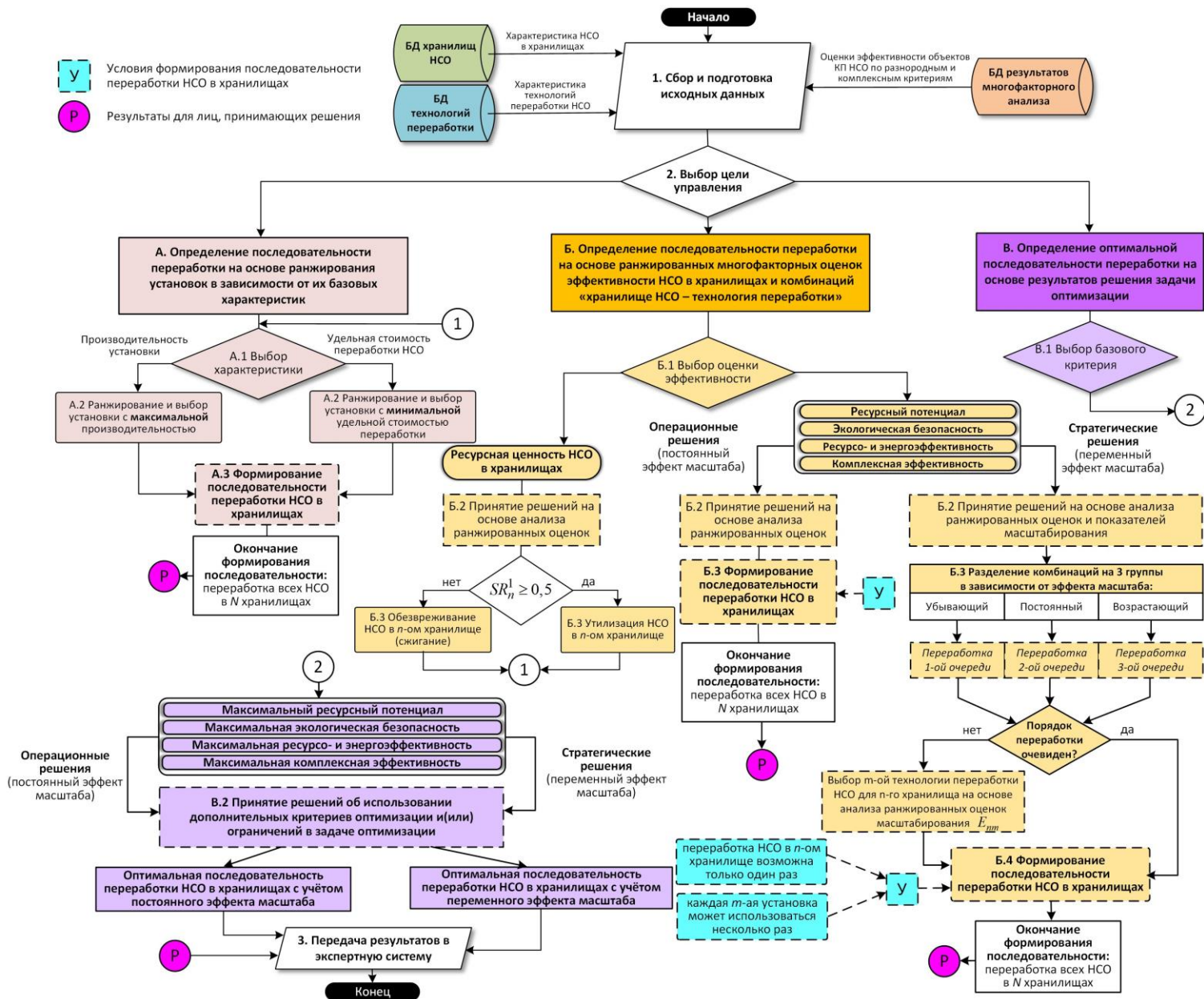


Рис. 10 -Алгоритм выбора и принятия управленческих решений в КП НСО

Принятие решений на основе ранжирования хранилищ НСО в соответствии с оценками  $SR_n^1$  их ресурсной ценности (**левая часть** ветви **Б**) зависит от заданного предельного значения оценки (рис. 6, **а**). Если  $SR_n^1 \geq 0,5$ , то НСО в  $n$ -ом хранилище необходимо переработать с минимальной удельной стоимостью (шаг Б.3 на рис. 10). При  $SR_n^1 < 0,5$  необходимо использовать установку по переработке НСО, обеспечивающую максимальную производительность (шаг Б.3 на рис. 10). В этом случае после шага Б.3 осуществляется переход к шагу А.1 и далее принятие соответствующих решений по ветке **А** алгоритма.

Принятие решений на основе ранжирования комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» в соответствии с оценками ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности и комплексной эффективности осуществляется в зависимости от выбранной стратегии управления переработкой отходов в системе. Операционные решения (схема **I** на рис. 3), основанные на ранжировании оценок эффективности с постоянным эффектом масштаба (рис. 6, **а-д**), принимаются в случае необходимости оперативной переработки отходов в хранилищах (**центральная часть** ветви **Б**). В этом случае алгоритм выполняется до шага Б.3, на котором формируется последовательность переработки НСО в хранилищах. Стратегические решения (схема **II** на рис. 3), основанные на ранжировании оценок эффективности с переменным эффектом масштаба (рис. 7, **а-г**), принимаются в случае необходимости увеличения объема извлекаемых ценных углеводородов (**правая часть** ветви **Б**). На шаге Б.3 комбинации «хранилище НСО – технология переработки» разделяются на 3 группы в зависимости от эффекта масштаба (постоянный, убывающий или возрастающий), тем самым формируются три возможные очередности переработки. В случае, если очередность по ранжированию оценок эффективности является неочевидной, то рассматривается дополнительное ранжирование оценок масштабирования  $E_{nm}$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,  $m = \overline{1, M}$ , определяемых по формуле (12) с учётом сопоставления индексов (11).

Б.4 Определение последовательности переработки НСО в хранилищах. Для обеих стратегий (**центральная** и **правая** часть ветви **Б**) последовательность переработки отходов в хранилищах устанавливается при следующих условиях: переработка НСО в  $n$ -ом хранилище производится один раз, каждая  $m$ -ая технология может быть использована несколько раз.

**В. Определение оптимальной последовательности переработки на основе результатов решения задачи оптимизации.**



Шаги по ветви **В** аналогичны этапам алгоритма оптимизации (рис. 8) в части принятия решений: на шаге В.1 в зависимости от типа управленческих решений осуществляется выбор базового критерия оптимизации; на шаге В.2 принимаются решения об использовании дополнительных критериев оптимизации, базовых и дополнительных ограничений. В результате решения соответствующих оптимизационных задач формируются оптимальные последовательности переработки НСО в хранилищах с помощью ЭС (рис. 11) на третьем этапе алгоритма (рис. 10).

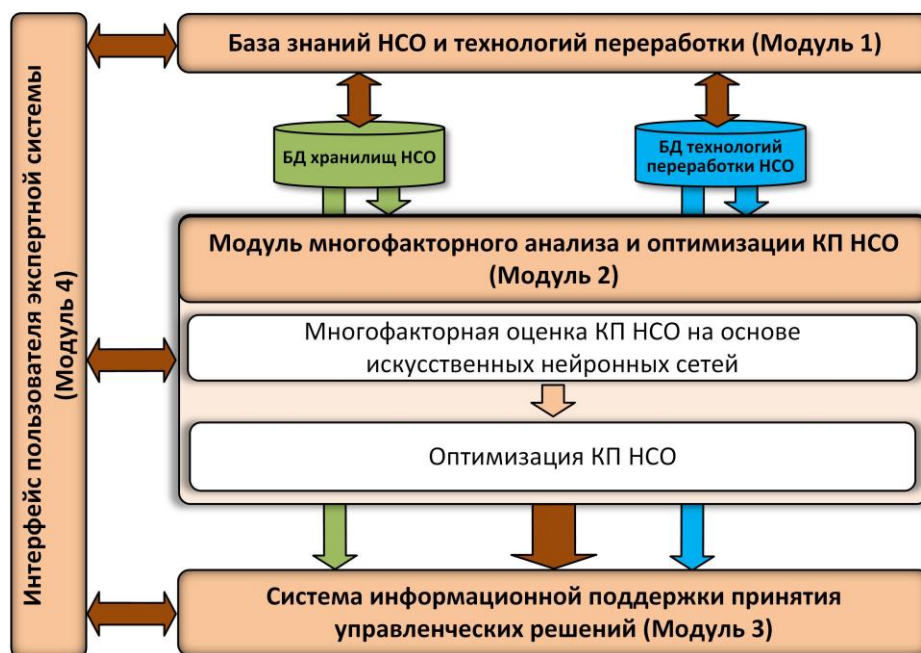


Рис. 11 - Информационная модель ЭС КП НСО

В диссертации в общем виде представлена архитектура ЭС по управлению КП НСО в нефтегазовой промышленности, которая включает четыре программно-алгоритмических модуля (рис. 11): базу знаний НСО и технологий их переработки (Модуль 1), модуль многофакторного анализа и оптимизации КП НСО (Модуль 2), систему информационной поддержки принятия управленческих решений (Модуль 3) и интерфейс пользователя ЭС (Модуль 4). Базы знаний интегрированы в ЭС, которая реализует модель поведения экспертов в данной области знаний, построенную с использованием процедур логического вывода и принятия решений на основе запросов на естественном языке. Основной целью разработки ЭС является создание эффективного инструмента, который должен помочь пользователям, не являющимся экспертами в рассматриваемой предметной области, принимать обоснованные решения при поиске оптимальных способов переработки НСО.



Основным компонентом ЭС является разработанный алгоритм выбора и принятия управленческих решений (рис. 10), включающий механизм поиска и извлечения информации из БД по технологиям переработки и НСО, а также пользовательский интерфейс.

В диссертации разработан и апробирован алгоритм технико-экономического обоснования предлагаемых оптимальных решений по переработке НСО в системе, позволяющий определить экономический эффект от их реализации. Анализ показал, что при оптимальных последовательностях переработки №1 (табл. 4) и №2 (табл. 5) средняя эффективность процессов возрастает на 118,1% и 387,3%, соответственно, по сравнению с существующей последовательностью.

В диссертации представлены рекомендации по практическому использованию полученных результатов в промышленности.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы диссертационного исследования.

1. Проведен системный анализ проблем переработки НСО нефтегазовой промышленности, предложены классификации НСО по источникам образования, методам и технологиям переработки НСО. Показано, что хранилища НСО и технологии их переработки могут рассматриваться в качестве элементов подсистем размещения и переработки сложно-структурированного КП НСО, который представляет собой единую систему, обладающую основными системообразующими свойствами. Определены характеристики элементов подсистем и установлены связи между ними, которые позволили сформировать набор параметров для многофакторного анализа и критерии оптимизации системы, разработать алгоритм анализа качества информации, БД хранилищ НСО и технологий переработки.

2. Предложена и апробирована методика системного анализа и оптимизации КП НСО в нефтегазовой промышленности, которая позволяет определять ключевые свойства и структурные закономерности функционирования системы. Методика включает теоретически обоснованные последовательные этапы разработки моделей для определения оценок эффективности, решения задач многофакторного анализа и оптимизации, принятия оперативных и стратегических управленческих решений, на каждом из которых математический аппарат DEA метода впервые используется в задачах управления переработкой отходов в нефтегазовой промышленности.

3. Разработаны и обоснованы проблемно-ориентированные модели для определения относительных оценок ресурсной ценности НСО в хранилищах, ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности,

комплексной эффективности комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с постоянным и переменным эффектами масштаба, которые позволяют ранжировать объекты КП НСО и определять очередность переработки отходов. Эти модели обеспечивают объективный анализ сложных многостадийных процессов переработки отходов, учитывая многообразные взаимосвязи между технико-экономическими, технологическими, ресурсными, логистическими, энергетическими и экологическими параметрами.

4. Разработаны и обоснованы методы и алгоритмы решения задач многофакторного анализа, которые позволяют качественно и количественно оценить её функциональные и масштабные характеристики на основе ряда ключевых критериев: ресурсной ценности и потенциала, экологической безопасности, эффективности использования ресурсов и энергии, а также общей эффективности системы. Методы и алгоритмы многофакторного анализа апробированы на примере КП НСО (90 хранилищ НСО и 14 технологий переработки). Ранжировка полученных оценок эффективности позволила принять управленческие решения по выбору наилучших технологий для переработки НСО в хранилищах. Анализ показал, что менее 1% комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» имеют максимальные оценки комплексной эффективности при постоянном эффекте масштаба. При этом большая доля неэффективных или мало эффективных комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с оценками эффективности в диапазоне от 0 до 0,21 при постоянном (86,03%) и переменном (96,12%) эффектах масштаба свидетельствует о необходимости решения оптимизационных задач.

5. Рассмотрение комбинации «хранилище НСО — технология переработки» в качестве центрального объекта сравнения позволило разработать и теоретически обосновать алгоритмы и процедуры решения задач оптимизации КП НСО, направленные на достижение максимальной эффективности и экологической безопасности технологических процессов переработки отходов с учетом оперативных и стратегических управленческих решений. Апробация алгоритма и процедуры решения задачи однокритериальной оптимизации по критерию максимальной комплексной эффективности проведена на примере системы КП НСО (90 хранилищ НСО и 14 технологий переработки). Анализ результатов показал, что наибольшую массу полезных продуктов переработки (20622,8 т.) можно получить, используя стратегический подход к управлению системой с переменным эффектом масштаба. Апробация алгоритма и процедуры решения задачи многокритериальной оптимизации проведена на примере оптимизации по базовому критерию максимальной комплексной эффективности и

дополнительному критерию быстродействия КП НСО (16 хранилищ НСО и 5 технологических установок). Анализ результатов показал, что наилучшая последовательность комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» обеспечивает минимальное время переработки отходов (3603,18 ч) при максимальной суммарной комплексной эффективности (10,17).

6. Разработан алгоритм выбора и принятия управленческих решений в КП НСО, включающий три вида целей принятия решений: оценка текущего состояния системы на основе анализа ранжированных базовых параметров технологий переработки, определение последовательности переработки на основе ранжирования оценок эффективности и определение оптимальной последовательности переработки на основе результатов решения оптимизационных задач в зависимости от выбранной стратегии управления переработкой отходами в системе.

7. Для упрощения вычислительных процедур многофакторного анализа разработана и обоснована методика определения оценок эффективности комплексной переработки НСО на основе ИНС. Методика апробирована на примере определения оценок ресурсной ценности НСО в хранилищах для ИНС с различной архитектурой. Наилучшие результаты обеспечивают среднюю относительную ошибку 5,7% и максимальную относительную ошибку 26,0%.

8. Предложена архитектура ЭС поддержки принятия управленческих решений в КП НСО нефтегазовой промышленности, позволяющей пользователям, не являющимся экспертами в рассматриваемой предметной области, принимать обоснованные решения при поиске оптимальных способов переработки НСО в системе.

9. Разработан алгоритм технико-экономического обоснования предлагаемых оптимальных решений в КП НСО, позволяющий определить экономическую эффективность оптимальных управленческих решений с учётом стратегии функционирования системы. Апробация алгоритма выявила, что значение средней эффективности технологической переработки НСО в хранилищах при сравнении существующей последовательности с оптимальными последовательностями №1 и №2 по критерию максимальной комплексной эффективности в относительном выражении больше на 118,1% и 387,3%, соответственно. Предлагаемые оптимальные решения обеспечили увеличение общей эффективности технологической переработки НСО на 57,72 и 169,68 млн руб., соответственно.

10. Разработано специализированное программное обеспечение для апробации и реализации разработанных методик системного и многофакторного анализа,

оптимизационных алгоритмов и процедур для комплексной переработки НСО в нефтегазовой промышленности.

Главным научным результатом диссертации является разработка новой методологии решения актуальной проблемы переработки НСО, основанной на отличающихся от известных способах интеграции методов системного анализа и оптимизации, которая обеспечивает значительное улучшение показателей качества работы промышленных комплексов в нефтегазовой отрасли и снижение их вредного воздействия на окружающую среду. Таким образом, можно считать, что основная цель диссертационного исследования достигнута.

## Основные публикации по теме диссертации

### Список публикаций в рецензируемых журналах из перечня ВАК:

1. *Дервянов М.Ю.* Системный анализ сложно-структурированного комплекса переработки нефтесодержащих отходов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2024, N 32(1), С. 32-55.

2. *Дервянов М.Ю.* Анализ показателей масштабирования при оценке ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе метода DEA//Системы анализа и обработки данных, 2023, N 3(91), С. 47-68.

3. *Дервянов М.Ю.* Анализ ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов с учетом переменного эффекта масштаба//Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика, 2023, N 3, С. 65-75.

4. *Казаринов А.В., Дервянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э.* Системный анализ развития низкоуглеродных технологий производства водорода//Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки, 2023, N 4, С. 19-32.

5. *Дервянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э.* Анализ ресурсной ценности и ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе DEA-метода//Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки, 2022, N 4, С. 27-34.

6. *Дервянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А., Мандра А.Г., Пименов А.А.* Многокритериальная оптимизация комплексной переработки нефтесодержащих отходов по системным критериям качества//Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2022, N 30(3), С. 15-30.

7. *Казаринов А.В., Дервянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э.* Классификация и анализ локализации проектов по производству водорода//Системы анализа и обработки данных, 2022, N 4(88), С. 31-48.

8. *Плешивцева Ю.Э., Казаринов А.В., Дервянов М.Ю.* Многофакторный анализ процессов производства дорожных битумов путем окисления продуктов нефтепереработки//Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2021, Т. 29, N 3(71), С. 52-66.

9. *Дервянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А.* Многофакторный анализ ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса//Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2021, N 29(1), С. 19-35.

**Список публикаций в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в системах Web of Science и Scopus:**

10. *Pleshivtseva Y., Derevyanov M., Pimenov A., Rapoport A.* Comparative analysis of global trends in low carbon hydrogen production towards the decarbonization pathway//International Journal of Hydrogen Energy, 2023, Vol. 48, No. 83, P. 32191-32240.

11. *Pleshivtseva Y., Derevyanov M., Pimenov A., Rapoport A.* Comprehensive review of low carbon hydrogen projects towards the decarbonization pathway//International Journal of Hydrogen Energy, 2023, Vol. 48, No. 10, P. 3703-3724.

12. *Tyukilina P.M., Krasnikov P.E., Derevyanov M.Yu., Pimenov A.A., Pleshivtseva Yu.E.* Assessment of Resource Potential of Heavy Petroleum Residues by Data Envelopment Analysis//Petroleum Chemistry, 2019, Vol. 59, No. 11, P. 1207-1212.

13. *Pleshivtseva Yu.E., Derevyanov M.Yu., Kashirskikh D.V., Pimenov A.A., Kerov A.V., Tyan V.K.* Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method//Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry, 2018, No. 11, P. 139-144.

14. *Pleshivtseva Y.U.E., Derevyanov M.Y., Setin S.P.* System analysis of quality management of primary refining process//Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry, 2014, No. 8, P. 124-128.

**Список публикаций в других журналах, сборниках научных трудов, материалах международных и всероссийских научных конференций:**

15. *Afinogentov A., Derevyanov M., Pleshivtseva Yu., Mandra A.* Multi-criteria optimization of the system for processing of technogenic waste of oil and gas enterprises//AIP Conf. Proc. – 2023. – Vol. 2910 (1). – P. 020118.

16. *Derevyanov M., Pleshivtseva Yu., Afinogentov A.* Multi-factorial Analysis of Environmental Safety and Optimization of Oily Waste Recycling System//Advances in

Automation IV : Lecture Notes in Electrical Engineering/ eds. A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov. – Cham: Springer International Publishing, 2023. – Vol. 986. – P. 186-193.

17. *Afinogentov A.A., Bagdasarova Y.A., Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E.* Application of Neural Networks to Assess the Resource Value of Oil-Contaminated Waste Storage Facilities//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, Vol. 988, No. 2, P. 022073.

18. *Afinogentov A.A., Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E.* Evaluation of the Technical and Economic Efficiency of Oil-Contaminated Wastes Recycling System Based on DEA-Method//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, Vol. 666, No. 3, P. 032032.

19. *Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A.* Development Approach to an Expert System for Efficiency Assessment of Waste Recycling in the Oil Industry Based on DEA Models//2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – Lipetsk, Russian Federation: IEEE, 2021. – P. 817-822.

20. *Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A., Kirpichenkov S.A., Mandra A.G., Pimenov A.A.* Application of data envelopment analysis for multi-criteria evaluation of system for technogenic waste recycling in oil refining industry//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, Vol. 1089, No. 1, P. 012023.

21. *Кирпиченков С.А., Деревянов М.Ю.* Анализ экономической эффективности и экологической безопасности технологического комплекса по переработке нефтесодержащих отходов на основе метода DEA//Сетевое издание научный журнал «НАУКОСФЕРА», 2021, N 4-2, С. 135-144.

22. *Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A.* Simulation and Evaluation of the Efficiency of Oil-contaminated Wastes Recycling System//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, Vol. 459, No. 4, P. 042058.

23. *Деревянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А., Мандра А.Г., Пименов А.А.* Оценка экологической безопасности сложно-структурированной системы переработки техногенных отходов// ММТТ. – 2020. – Т. 5. – С. 57-63.

24. *Деревянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А., Мандра А.Г., Пименов А.А.* Многокритериальная оценка сложно-структурированной системы комплексной переработки техногенных отходов нефтеперерабатывающей промышленности// ММТТ. – 2020. – Т. 4. – С. 37-44.

25. *Derevyanov M., Pleshivtseva Y., Afinogentov A., Mandra A., Pimenov A.* Simulation and Multi-Objective Evaluation of Reuse Potential of Waste Recycling System

for Oil And Gas Industry//2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). – Samara, Russia: IEEE, 2019. – P. 429-434.

26. *Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E., Kordyukova L.S., Rapoport A.V.* Using DEA models to measure the efficiency of energy saving projects//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, Vol. 552, No. 1, P. 012020.

27. *Деревянов М.Ю., Каширских Д.В.* Алгоритм контроля качества данных об отходах нефтегазового комплекса//Инновации и «зеленые» технологии: Региональная научно-практическая конференция: сб. материалов и докладов, Самара, 29 ноября 2017 года. – Самара: Вектор, 2018. – С. 116-122.

28. *Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A., Pimenov A.A., Krasnikov P.E., Derevyanov M.Yu.* Optimization of the Disposal System of Oily Waste According to the Criterion of Environmental Safety//Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” (ISEES 2019). – Grozny, Russia: Atlantis Press, 2019. – Vol. 1. – P. 33-38.

29. *Плешивцева Ю.Э., Деревянов М.Ю., Каширских Д.В.* Анализ ресурсной ценности объектов хранения нефтешламов Самарского региона//Инновации и «зеленые» технологии: Региональная научно-практическая конференция: сб. материалов и докладов, Самара, 29 ноября 2017 года. – Самара: Вектор, 2018. – С. 137-144.

30. *Лившиц М.Ю., Плешивцева Ю.Э., Деревянов М.Ю.* Системный анализ уровня автоматизации и качества управления процессом первичной переработки нефти//Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: материалы Международной научно-практической конференции. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2016. – Т. 2. – С. 166-169.

#### **Государственная регистрация программ для ЭВМ и баз данных:**

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669216 РФ. Многокритериальная оптимизация комплексной переработки нефтесодержащих отходов по системным критериям качества : № 2022669013 : заявл. 18.10.2022 : опубл. 18.10.2022: / Ю.Э. Плешивцева и др.

32. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622779 РФ. База данных для оптимизации сложно-структурированной системы комплексной переработки техногенных отходов нефтегазового комплекса : № 2021621717 : заявл. 20.08.2021 : опубл. 03.12.2021: / Ю.Э. Плешивцева и др.

33. Свидетельство № 2021664227 Российская Федерация. Оптимизация сложно-структурированной системы комплексной переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса: № 2021663386 ; заявл. 24.08.2021 ; зарегистр. 01.09.2021. / Ю.Э. Плешивцева и др.

34. Свидетельство № 2019621436 РФ. База данных по отходам нефтегазового комплекса: свидетельство о государственной регистрации базы данных: № 2019621312 ; заявл. 29.07.2019 ; зарегистр. 08.08.2019. / Ю.Э. Плешивцева, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра.

35. Свидетельство № 2019621435 РФ. База данных по технологиям утилизации отходов нефтегазового комплекса: свидетельство о государственной регистрации базы данных: № 2019621313 ; заявл. 29.07.2019 ; зарегистр. 08.08.2019./ Ю.Э. Плешивцева, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра.

36. Свидетельство №2018662226 РФ. Контроль качества данных о нефтесодержащих отходах: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: №2018619186 ; заявл. 29.08.2018 ; зарегистр. 02.10.2018/ Ю.Э. Плешивцева, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра.

37. Свидетельство №2018663621 РФ. Многофакторная оценка ресурсного потенциала нефтесодержащих отходов: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2018619315 ; заявл. 30.08.2018 ; зарегистр. 01.11.2018./ Ю.Э. Плешивцева, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.02,  
созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»  
(протокол № 8 от «6» сентября 2024 г.)

Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0.

Отпечатано в типографии.  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Отдел типографии и оперативной печати,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244