

УДК 665.6/.7:502.171

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СЛОЖНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ***М.Ю. Деревянов**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: mder2007@mail.ru

Аннотация. Предлагается новый подход к системному анализу сложноструктурированного комплекса переработки (КП) нефтесодержащих отходов (НСО) на основе метода *Data Envelopment Analysis*, который позволяет решать задачи выбора оптимальных технологий переработки по разнородным критериям ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения и комплексной эффективности. Представлены новые классификации: НСО по источникам образования в нефтегазовой промышленности и методам переработки. Проведен анализ системных проблем, сопровождающих технологические процессы переработки НСО, которые подтверждают необходимость рассматривать хранилища НСО и технологии их переработки в рамках единой системы, состоящей из двух подсистем размещения и переработки. Проанализированы общесистемные свойства КП НСО и взаимосвязи его основных элементов, выявлено наличие устойчивых связей между элементами системы.

Разработана методика системного анализа и оптимизации КП НСО, состоящая из 10 последовательных этапов и включающая разработку баз данных и специального программного обеспечения, проведение многофакторного анализа и оптимизации, использование искусственных нейронных сетей для увеличения скорости вычислений, разработку системы информационной поддержки принятия научно-обоснованных управленческих решений.

Показаны результаты апробации методики для анализа КП, состоящего из 90 хранилищ НСО и 14 технологий переработки, расположенных в пределах одного региона. Получены результаты решения задач оптимизации системы переработки НСО по критерию максимальной комплексной эффективности с учётом постоянного и переменного эффектов масштаба.

Предлагаемый подход может быть распространен на другие регионы Российской Федерации с развитой нефтегазовой промышленностью, где существует необходимость принятия срочных мер по ликвидации хранилищ отходов и улучшению экологической обстановки.

Ключевые слова: системный анализ, комплекс переработки, нефтесодержащие отходы, технологии, классификация, методика, *Data Envelopment Analysis*, нефтегазовая промышленность

* Максим Юрьевич Деревянов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Введение

Нефтедержащие отходы (НСО) – это различающиеся по составу и физико-химическим свойствам отходы, содержащие углеводородные смеси, образующиеся в различных отраслях промышленности в процессе транспортировки, использования и хранения нефтепродуктов, испытаний и ремонтов оборудования, строительства, утилизации промышленных отходов и агрегатов [1]. По данным Росстата, в 2022 году в секторе добычи нефти и газа и предоставлении услуг в этой сфере образовалось 13,94 млн тонн НСО [2]. В связи с ужесточением законодательства в области охраны окружающей среды производитель и потребитель несут прямую ответственность за переработку (обезвреживание и утилизацию) образовавшихся отходов [3]. Поскольку нормы переработки НСО в России до сих пор не утверждены, доля переработанных НСО в 2022 году составила всего 26,2 % (3,54 млн тонн) [2]. Это привело к нарастанию экологических проблем из-за ежегодного увеличения площадей специальных полигонов для захоронения отходов примерно на 400 тысяч га [4] и неэффективного использования технологий утилизации и обезвреживания, основной из которых в настоящее время является сжигание [5]. Мировой опыт показывает, что за счёт применения современных технологий и обоснованных управленческих решений долю переработки НСО можно довести до 90 % [6; 7]. Основными причинами низкой эффективности использования отходов в нефтегазовой промышленности Российской Федерации можно считать недостаток отечественных инновационных технологий переработки и отсутствие целевого системного подхода к проблемам рационального использования и обращения с НСО. В условиях усиливающейся международной конкуренции развитие нефтегазовой промышленности должно удовлетворять современным тенденциям, требующим инновационных наукоемких подходов к вовлечению НСО в хозяйственный оборот в качестве вторичных материальных ресурсов при обеспечении максимальной энергоэффективности производственного цикла и его экологической безопасности.

В основу современного обращения с любыми отходами, включая нефтедержащие, закладывается концепция экономики замкнутого цикла [8–10], согласно которой ресурсы используются максимально полно и эффективно, что приводит к отсутствию накоплений отходов [11]. Этот эффект может быть достигнут за счёт применения остатков переработанных НСО в производстве битумных смесей [12; 13], строительных материалов [14; 15], топлива для котельных установок [16] и др. [17; 18].

В статье предлагается новый системный подход, основанный на рассмотрении объектов хранения отходов и технологий их переработки как элементов единой системы, представляющей собой сложноструктурированный комплекс переработки (КП) НСО. Такой системный подход и разработанная методика многофакторного анализа позволяют решать задачи выбора оптимальных технологий по разнородным критериям ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения и комплексной эффективности и формировать научно обоснованные стратегии управления на основе информационной системы поддержки принятия решений.

Исследование можно разделить на следующие этапы: а) приводится классификация НСО по источникам их образования в нефтегазовой промышленности; б) рассматривается классификация методов переработки НСО и анализируются основные системные проблемы, связанные с процессами переработки; в) анали-

зируются взаимосвязи основных элементов КП НСО; г) приводится описание разработанной методики системного анализа КП НСО в нефтегазовой промышленности; д) представляются основные результаты апробации методики на примере одного региона; е) приводятся основные выводы и рекомендации по практическому использованию методики в нефтегазовой промышленности.

1. Классификация НСО по источникам образования в нефтегазовой промышленности

Подходы к классификации НСО по различным признакам широко представлены в литературных источниках [19–24], однако в них не в полном объеме учитываются источники образования отходов в соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов (ФККО) [25]. По данным ФККО, в 2024 году насчитывается 367 видов НСО во всех сферах производства и потребления, в том числе 173 вида отходов в нефтегазовой промышленности, классификация которых показана на рис. 1 и 2.

Большая часть отходов в представленной классификации относится к III (93 вида НСО) и IV (77 видов НСО) классам опасности и образуется при добыче сырой нефти и природного газа, включая газовый конденсат нефтяного (попутного) газа, пластовую воду, нефтесодержащую эмульсию при очистке и осушке природного газа и/или газового конденсата, отработанные буровые растворы и шламы, сточные воды и отходы ремонта оборудования. Компонентный состав и агрегатное состояние таких отходов в случае отсутствия длительного хранения варьируются в известных пределах и позволяют использовать существующие на предприятиях нефтегазовой промышленности технологии переработки НСО [6; 26]. Это не исключает проблем, связанных с низкой производительностью и высокими материальными, энергетическими и финансовыми затратами при реализации типовых технологий по сравнению с новыми передовыми технологиями переработки. Кроме того, в случае необходимости переработки НСО из законсервированных хранилищ или отходов, поступающих на переработку из неизвестных источников, выбор оптимального решения по способу переработки (утилизация или обезвреживание) и соответствующей технологии переработки представляет собой сложную задачу. Решение этой задачи невозможно без применения многофакторного подхода к анализу НСО и технологий для их переработки как элементов единого комплекса переработки.

2. Классификация методов переработки НСО

Существующие подходы к классификации НСО в основном разделяют технологии переработки на два направления обращения с отходами: утилизацию и обезвреживание [18; 20; 22–24] (см. рис. 1, 2). Такая классификация не учитывает выраженные функции технологий по очистке жидких НСО физическими методами (фильтрация, флотация, гравитационное разделение и др.) в основном от механических и минеральных примесей и предназначенных, по сути, для восстановления сырья на основе нефтяных углеводородов и его дальнейшего вторичного использования [27; 28]. Кроме того, комбинирование различных технологий переработки НСО может дать синергетический эффект от их применения [28].

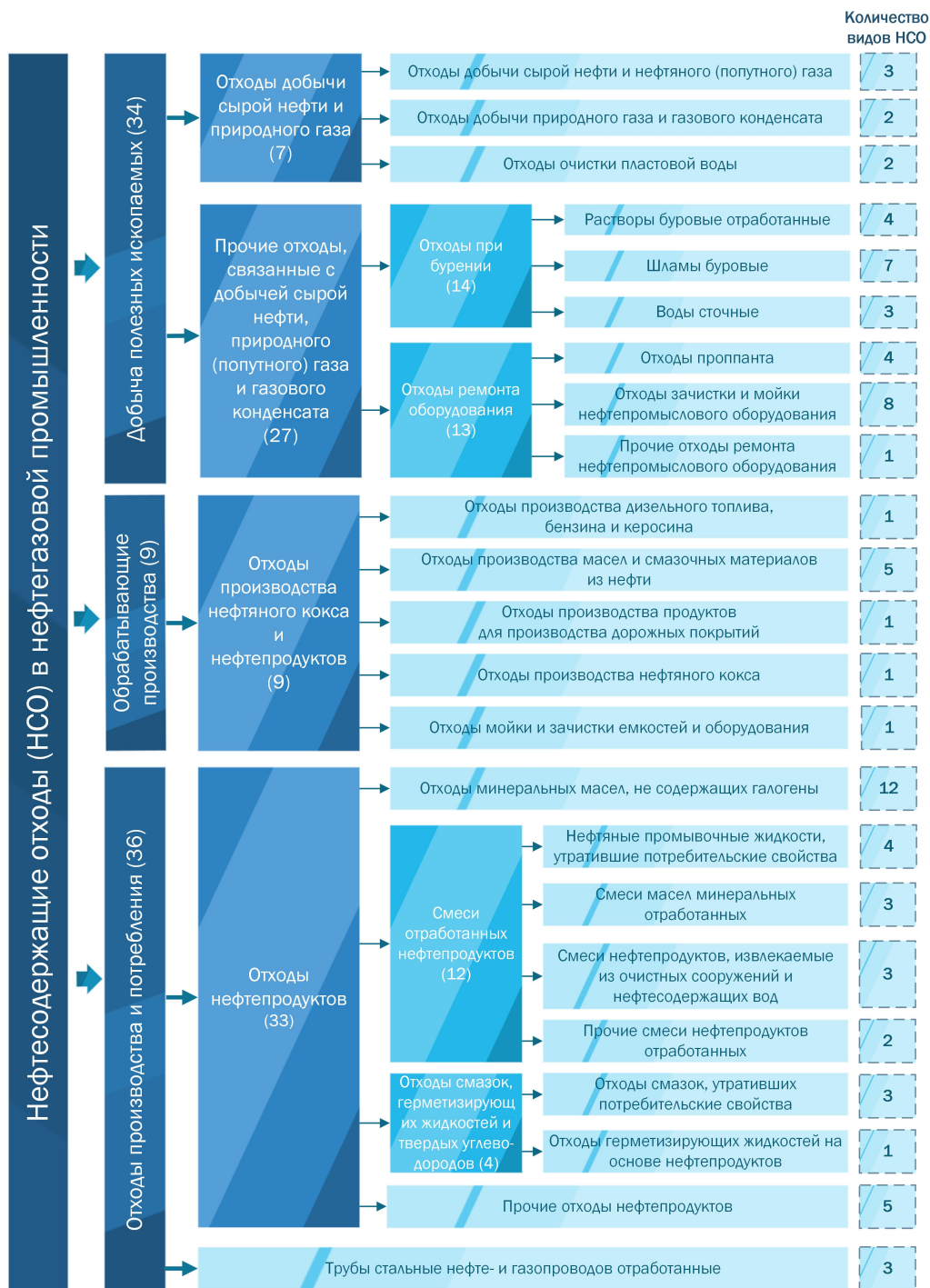


Рис. 1. Классификация НСО по источникам образования в нефтегазовой промышленности (начало)

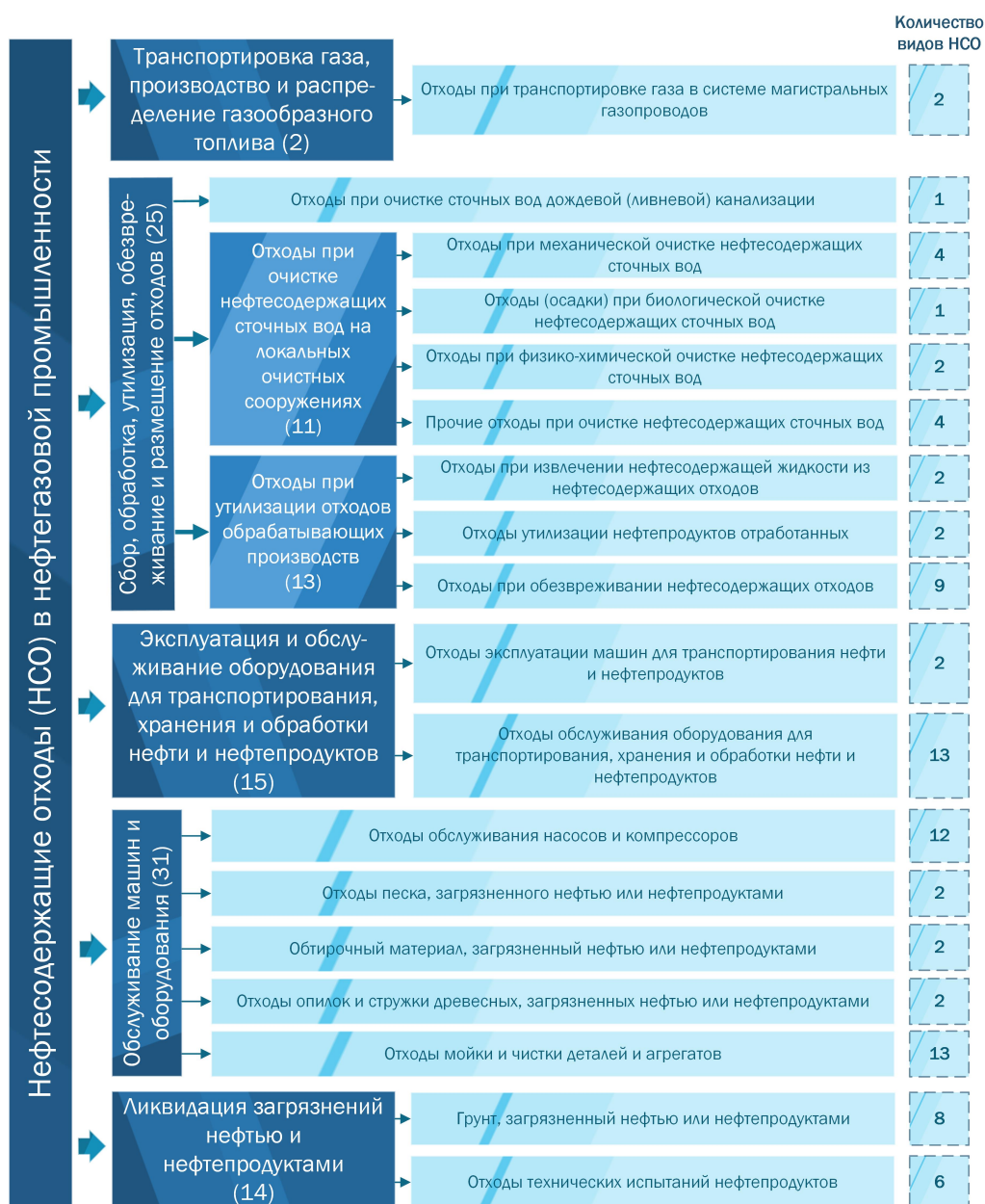


Рис. 2. Классификация НСО по источникам образования в нефтегазовой промышленности (окончание)

Методы переработки НСО можно разделить на четыре категории: восстановительные, утилизационные, обезвреживающие и комбинированные (рис. 3). К восстановительным методам переработки НСО относятся физические методы, которые обычно применяются для предварительной очистки в сочетании с другими способами переработки с целью уменьшения их объема [29]. Физико-химические методы утилизации с использованием высокотемпературной обработки подразумевают извлечение нефтяных углеводородов из НСО с высоким

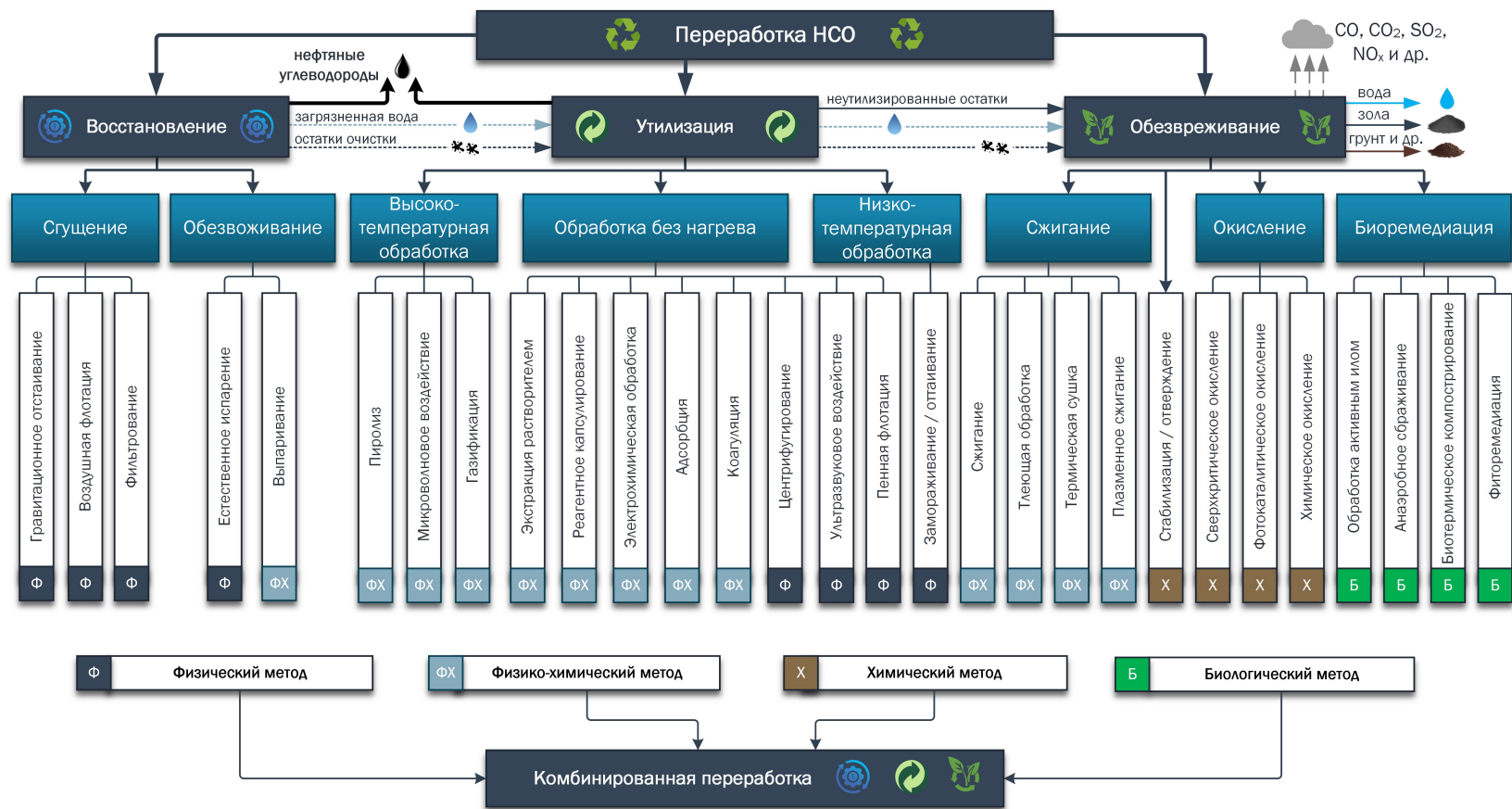


Рис. 3. Классификация методов и технологий переработки НСО

содержанием нефти [30; 31]. Химические и физико-химические методы обезвреживания обычно используются для обработки НСО с низким содержанием нефти [32], а обезвреживание загрязненного грунта обычно производят путем его восстановления биологическими методами [33]. Комбинированная переработка сочетает различные методы для повышения эффективности утилизации и обезвреживания.

Анализ технологий переработки НСО показывает, что их реализация связана со следующими системными проблемами:

- *Физические методы*: длительность процесса отстаивания; образование вторичных отходов; трудоемкость очистки оборудования; низкая степень очистки; сбросы сточных вод; возможность применения только к жидким отходам.
- *Физико-химические методы*: сложность утилизации адсорбента; сложность оборудования; образование вторичных отходов; сбросы сточных вод; сложность подбора растворителей; выбросы в атмосферу продуктов сгорания; образование вторичных отходов; необходимость утилизации теплоты сгорания; необходимость хранения (накопления), утилизации и обезвреживания отходов и применение реагентов; физическое воздействие на окружающую среду (шум, запахи и т. д.).
- *Химические методы*: высокая стоимость реагентов; образование вторичных отходов; сбросы сточных вод; применение в основном к жидким отходам.
- *Биологические методы*: большая длительность переработки; необходимость подготовки площадки для переработки; выбросы в атмосферу; невозможность организации непрерывной переработки; применение только к твердым отходам (загрязнённый грунт) с низким содержанием углеводородов.

3. Анализ взаимосвязи основных элементов КП НСО

Анализ разработанных классификаций, основных характеристик и параметров отходов и технологий их переработки позволяет рассматривать КП НСО в качестве единой системы, обладающей следующими системными свойствами: целостностью, делимостью, эмерджентностью, организованностью, функциональностью и структурностью.

Основу КП НСО составляют две подсистемы: подсистема размещения (ПР) и подсистема переработки (ПП), основными элементами которых являются хранилища отходов и технологии их переработки соответственно (рис. 4). Объектами анализа являются комбинации «хранилище НСО – технология переработки», которые соответствуют требованиям совместимости характеристик элементов подсистем, что подтверждает интегративные качества КП НСО.

Основная взаимосвязь между характеристиками элементов подсистем наблюдается в выборе метода переработки с требуемыми характеристиками перерабатываемого отхода технологией (установкой) в зависимости от характеристик накопленного в хранилище отхода. Дополнительными взаимосвязями элементов являются месторасположение, наличие требуемой инфраструктуры, производительность технологии по паспортным данным и её мобильность.

Результаты анализа связей между элементами рассматриваемого комплекса позволили разработать базы данных НСО [34] и технологий их переработки [35].

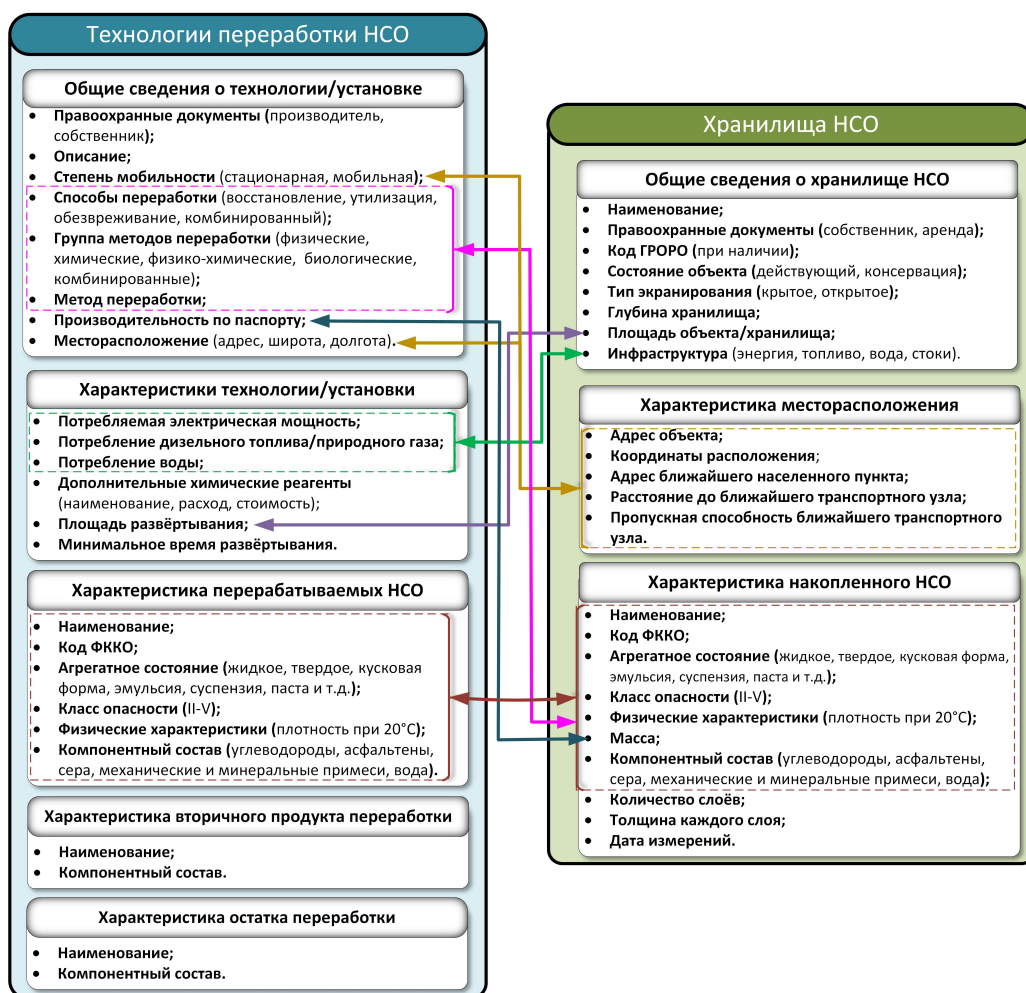


Рис. 4. Взаимосвязь основных характеристик элементов подсистем КП НСО

4. Разработка методики системного анализа КП НСО в нефтегазовой промышленности

На основе проведенного обоснования системных свойств и предложенных способов классификации отходов, методов и технологий их переработки разработана методика системного анализа и оптимизации КП НСО в нефтегазовой промышленности (рис. 5), которая заключается в реализации следующих этапов.

1. Анализ структур и общесистемных свойств ПР и ПП.
2. Анализ основных элементов подсистем, включая выявление основных характеристик элементов и системных проблем их функционирования.
3. Анализ характеристик элементов подсистем и связей между ними (см. рис. 4), включающий классификацию НСО по источникам образования (см. рис. 1, 2), классификацию методов и технологий переработки НСО (см. рис. 3).
4. Структуризация и систематизация информации о хранилищах НСО и технологиях переработки отходов, разработка баз данных, обеспечивающих наиболее рациональный способ обработки информации и её выборки по заданным критериям.

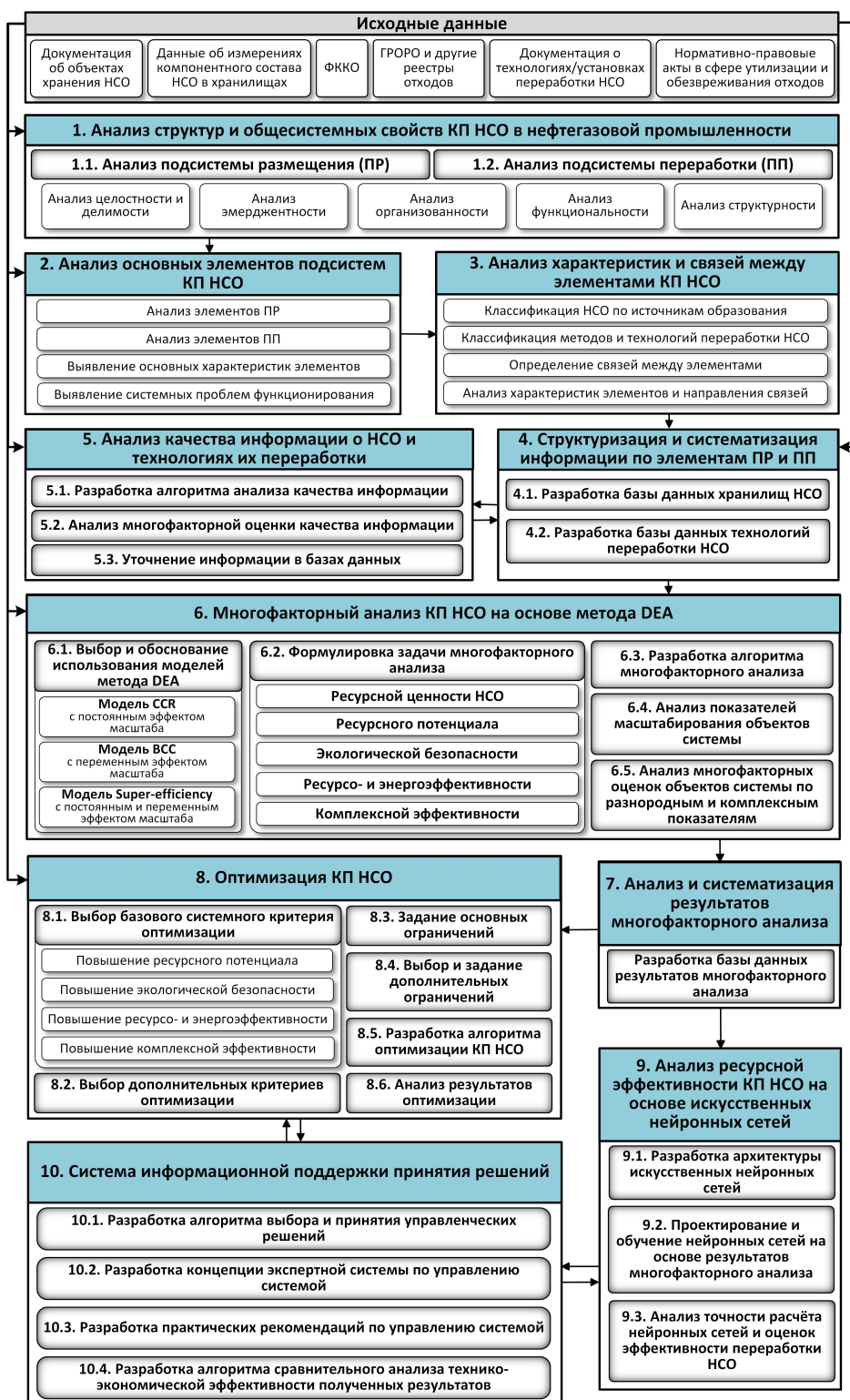


Рис. 5. Методика системного анализа и оптимизации КП НСО в нефтегазовой промышленности

5. Анализ качества информации о НСО и технологиях их переработки для получения многофакторной оценки полноты, достоверности, корректности, актуальности и непротиворечивости информации в базах данных. Этап основан на алгоритме, который описан и апробирован в [36].

6. Многофакторный анализ КП НСО на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA) [37], включающий выбор и обоснование использования моделей метода DEA, формулировку задач и разработку алгоритма многофакторного анализа, анализ результатов решения задач в форме оценок эффективности и показателей масштабирования.

Выбор моделей CCR [38], BCC [39] и Super-Efficiency [40] метода DEA в качестве структурной основы для формулировки задач многофакторного анализа КП НСО нефтегазовой промышленности обосновывается:

- использованием характеристик НСО и технологий переработки в качестве входных и выходных параметров, соответствующих поставленным в работе задачам математического программирования (ЗМП);
- возможностью расчёта показателей масштабирования (эффекта масштаба и оценки эффективности масштабирования), анализ которых позволяет прогнозировать результаты переработки НСО при выборе эффективного управления на различных уровнях принятия решений (оперативном и стратегическом);
- возможностью теоретической интерпретации результатов решения ЗМП в виде оценок эффективности на каждом этапе анализа, соответствующих закономерностям и понятиям, используемым и принятым в области переработки НСО;
- возможностью определения наилучших объектов в системе переработки НСО и ранжировки объектов сравнения по величине относительных оценок эффективности на каждом этапе многофакторного анализа.

Решение задач многофакторного анализа позволяет сравнить комбинации «хранилище НСО – технология переработки» и определить относительные оценки ресурсной ценности, ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения и комплексной эффективности. Апробация предложенного подхода описана и представлена в [41–47].

7. Анализ и систематизация результатов многофакторного анализа, включающий разработку соответствующей базы данных [48].

8. Решение задач оптимизации КП НСО включает выбор одного из базовых критериев (повышение ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности или комплексной эффективности) и дополнительных критериев оптимизации, основных и дополнительных ограничений, а также анализ полученных результатов. Решение задач оптимизации в форме ЗМП осуществляется в соответствии с созданным алгоритмом с помощью разработанного специального программного обеспечения с использованием процедур целочисленной оптимизации и симплекс-метода [49].

Анализ полученных результатов оптимизации проводится по 11 основным локальным и общим характеристикам оптимального набора технологических установок в системе комплексной переработки НСО, используемых в задачах многофакторного анализа (длительность переработки НСО; масса реагентов; расход топлива (энергии); выбросы парниковых газов, сернистого ангидрида и сажи в атмосферу; масса образовавшейся золы и загрязненной воды; удельные энергетические затраты на доставку отходов или технологий; время доставки отходов

или технологий; масса полезных углеводов), и по пяти оценкам эффективности многофакторного анализа (ресурсной ценности НСО в хранилищах; ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности, комплексной эффективности комбинаций «хранилище НСО – технология переработки»). Результаты оптимизации после анализа передаются в систему информационной поддержки принятия управленческих решений. Описание и апробация этапа представлены в [50; 51].

9. Анализ ресурсной эффективности КП НСО на основе искусственных нейронных сетей позволяет упростить вычислительные процедуры оптимизации и анализа данных для принятия научно обоснованных управленческих решений. Предлагаемый подход может быть распространён для анализа ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности, комплексной эффективности КП НСО. В результате выполнения этапа разрабатываются многослойные искусственные сети на основе персептронов, обучение и тестирование которых проводится с использованием обучающих наборов данных в виде оценок ресурсной ценности НСО (см. этап 6). Предлагаемый подход описан и апробирован в [52].

10. Система информационной поддержки принятия управленческих решений основана на подходе, который описан и апробирован в [53]. Разработанная система позволяет использовать частные и обобщенные показатели эффективности функционирования КП НСО, полученные в результате оптимизационных процедур на 8 или 9 этапе, и сформировать локальные управляющие воздействия на систему или обосновать перспективные стратегии управления системой переработки отходов. В состав этапа входит разработка концепции экспертной системы (ЭС) для КП НСО, в рамках реализации которой предложена структура её информационной модели, включающая три основных программно-алгоритмических модуля: модуль многофакторного анализа эффективности и оптимизации комплекса переработки НСО, экспертная база знаний НСО и технологий их переработки, интерфейс пользователя ЭС. Для проведения анализа и сопоставления результатов оптимизации с текущими условиями переработки НСО в нефтегазовой промышленности разработан алгоритм сравнительного анализа технико-экономической эффективности полученных результатов, концепция которого описана и апробирована в [54].

Последовательная реализация отдельных этапов методики при необходимости повторяется.

5. Апробация методики системного анализа КП НСО

В рамках апробации разработанной методики решения были решены задачи оптимизации регионального КП НСО по базовому критерию максимальной комплексной эффективности с учётом постоянного и переменного эффекта масштаба (этап 8, рис. 5), при этом дополнительные критерии оптимизации и ограничения не использовались.

Рассматривается КП НСО, который включает $N = 90$ хранилищ, содержащих отходы различных агрегатных состояний (жидкие, эмульсии, пастообразные) и источников образования (буровые шламы и отработанные растворы, отходы добычи сырой нефти, очистки пластовой воды, нефтесодержащие грунты и др.). Общая масса НСО в хранилищах составляет 175,9 тыс. т, общая площадь всех хранилищ – 100,6 тыс. м² (табл. 1). В табл. 2 представлены основные характери-

стики $M = 14$ установок (технологий) переработки НСО, входящих в рассматриваемый комплекс.

Таблица 1

**Основные статистические данные по компонентному составу
и массе накопленных НСО в $N = 90$ хранилищах**

Статистическая характеристика	Масса НСО, [т]	Компонентный состав НСО в N хранилищах, [% масс.]				
		Вода	Асфальтены и смолы	Механические и минеральные примеси	Сера	Светлые углеводороды
Минимальное значение	154	5,221	4,713	3,504	0,617	9,885
Максимальное значение	24452	72,884	21,864	27,207	2,809	85,694
Среднее значение	1955	32,969	10,773	14,229	1,651	41,906
Стандартное отклонение	2777,4	12,429	4,401	5,392	0,473	13,237

Анализ полученных результатов решения поставленных однокритериальных оптимизационных задач показал, что при постоянном эффекте масштаба (табл. 3) только шесть технологий ($m = 1,3,8,11-13$) задействованы в переработке НСО. При этом чаще других используется технология № 11 (УПБШ-10С/УПБШ-10СД, табл. 2), применение которой для переработки НСО в 51-м хранилище обеспечивает максимальную массу полезных продуктов рециклинга – 4404,8 т.

При переменном эффекте масштаба (табл. 4) восемь технологий ($m = 2,3,8,10-14$) задействованы в переработке НСО и наиболее часто используется технология № 13 (Eco-TechRecOil Oy, табл. 2), применение которой для переработки отходов в 34-х хранилищах обеспечивает получение максимальной массы полезных продуктов рециклинга 9560,3 т. Сравнительный анализ результатов расчёта по двум представленным наборам технологий (см. табл. 3, 4) 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 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. Таким образом, выбор подхода к управлению переработкой в КП НСО зависит от заданной цели. Если требуется учитывать сразу несколько результирующих характеристик переработки, то выбор оптимальной стратегии управления усложняется и может потребоваться использование системы информационной поддержки принятия решений с привлечением экспертного мнения.

Таблица 2

Характеристики технологий переработки НСО

<i>m</i>	Название установки (технологии)	Метод/Способ переработки НСО	Производительность (по паспорту)
1	МегаМакс	Физический метод/ отстаивание, фильтрация	7–15 м ³ /ч
2	Mineraloel	Комбинированный метод/ фильтрация, пиролиз	2 м ³ /ч
3	COMPEX НТР 2,2	Физико-химический метод/ пиролиз	0,2 т/ч
4	COMPEX НТР 20	Физико-химический метод/ пиролиз	2–2,3 т/ч
5	Holo-Scru 10	Физико-химический метод/ термодесорбционная система (косвенного нагрева)	0,1–20 м ³ /ч
6	Electric-Scru 10	Физико-химический метод/ термодесорбционная система (косвенного нагрева)	0,1–20 м ³ /ч
7	Фортан-4	Физико-химический метод/ пиролиз	0,1–0,5 т/ч
8	Фортан-20	Физико-химический метод/ пиролиз	0,5–2,5 т/ч
9	Фортан ТМ 200	Физико-химический метод/ пиролиз	5,2–36 м ³ /ч
10	ПУ-01	Химический метод/ реагентное капсулирование	2 м ³ /ч
11	УПБШ-10С/УПБШ-10СД	Физический метод/ смешивание, фильтрация	10–15 м ³ /ч
12	УОГ-15-В2ГЦ2-10	Физический метод/ смешивание, центрифугирование, фильтрация	15–20 м ³ /ч
13	Eco-TechRecOil Oy	Комбинированный метод/ сорбционная очистка, фильтрация, отжим	30–50 м ³ /ч
14	Innotech	Физико-химический метод/ сорбционная очистка, фильтрация	0,3–0,35 т/ч

Результаты решения задачи повышения комплексной эффективности с учётом постоянного эффекта масштаба

Наименование групп характеристик		Параметры переработки										Оценки эффективности по критериям					
Наименование		Длительность переработки, [ч]	Масса реагентов, [г]	Расход топлива (энергии), [т]	Выбросы парниковых газов, [т]	Выбросы сернистого ангидрида, [т]	Выбросы в атмосферу сажи, [т]	Масса образовавшейся золы, [г]	Масса образовавшейся загрязненной воды, [т]	Удельные энергетические затраты на доставку, [руб./г]	Длительность доставки отходов или технологий, [ч]	Масса полезных продуктов рециклинга (углеводороды), [г]	Ресурсная ценность НСО	Ресурсный потенциал	Экологическая безопасность	Ресурсо- и энергоэффективность	Комплексная эффективность
Статистические данные																	
Минимальное значение		12,68	0	0,01	0,14	34,66	0	0	17,76	10,09	2,83	6,40	0,181	0,117	0,104	0,082	0,103
Максимальное значение		20363	584,83	30,29	1,34	4186,46	44,37	113,09	2571,09	7502,81	1508,13	1734,73	2,483	1,169	1	2,077	2,371
Среднее значение		457,30	44,68	1,29	0,50	684,23	5,42	8,76	265,38	1381,34	35,67	169,03	0,582	0,461	0,263	0,4	0,477
Стандартное отклонение		2205,33	77,39	4,06	0,21	604,25	9,84	20,94	336,02	1495,05	165,19	218,27	0,341	0,192	0,200	0,290	0,360
Суммарные данные		41157	4021,3	116,2	61580,4	488,2	788,2	23884,3	71585,9	1381,3	3210,4	15213,1	52,36	41,52	23,701	35,998	42,975
Номер технологии <i>m</i>	Количество хранилищ НСО	Суммарные данные по технологиям															
1	5	693	171,9	51,6	2842,4	1,5	26,2	991,5	8104,8	326,9	43,0	1771,0	4,666	0,744	2,6	1,446	3,511
3	1	5459,7	0	1,4	131,6	0	1,3	144,9	1196,9	14,8	71,1	281,3	0,791	0,420	0,916	1,312	2,371
8	3	22041,7	0	32,8	4377,3	0	0	2763,5	1378,3	28,3	2021,5	2069,3	3,386	0,986	2,776	2,600	3,725
11	51	10944,9	3829,3	8,2	33511,1	0,02	33,51	14214,7	50649,4	2176,7	712,4	4404,8	24,668	27,446	8,603	19,283	20,883
12	20	1666,1	18,4	17,7	14464,2	276,44	131,50	4003,49	8916,47	380,8	177,5	4141,2	12,376	5,249	4,937	6,543	7,657
13	10	351,6	1,7	4,5	6253,8	210,24	595,60	1766,23	1340,04	396	185	2545,6	6,477	6,675	3,859	4,815	4,827

Результаты решения задачи повышения комплексной эффективности с учётом переменного эффекта масштаба

Наименование групп характеристик		Параметры переработки										Оценки эффективности по критериям					
Наименование		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]	Ресурсная ценность НСО	Ресурсный потенциал	Экологическая безопасность	Ресурсо- и энергоэффективность	Комплексная эффективность
Статистические данные																	
Минимальное значение		3,52	0	0,04	0,06	0	0	0	17,76	10,09	4,13	14,11	0,181	0,055	0,134	0,019	0,0233
Максимальное значение		16969,3	7636,20	19,00	4,44	4395,74	90,35	418,65	2571,09	7485,23	2445,07	1789,38	2,483	4,444	Макс.*	4,075	4,0754
Среднее значение		485,98	101,46	0,99	0,59	652,17	14,02	32,12	265,38	779,85	104,08	229,14	0,582	0,589	-	0,240	0,2637
Стандартное отклонение		2278,44	804,31	2,30	0,49	529,63	15,58	52,77	336,02	961,32	315,82	223,33	0,341	0,488	-	0,451	0,4676
Суммарные данные		43738,5	9131,5	89,0	58695,0	1262,0	2890,8	23884,3	63890,5	779,9	9367,5	20622,8	52,36	53,01	-	21,566	23,738
Номер технологии <i>m</i>	Количество хранилищ НСО	Суммарные данные по технологиям															
2	5	188,3	0	8,2	2543,6	1,7	23,5	1492,9	8418,7	205,9	1659,6	1672,9	2,835	3,059	1,811	1,226	1,228
3	1	5459,7	0	1,4	131,6	0	1,3	144,9	1196,9	14,8	71,1	281,3	0,791	0,420	0,926	1,126	1,294
8	3	13732	0	20,4	1167,2	0	0,0	1902,8	1192,4	30,8	3991,7	551,8	1,268	0,835	2,514	0,853	1,325
10	1	16969,3	7636,2	11,1	0	0	0,0	2571,1	18027,4	477,0	60,9	864,9	0,328	0,109	Макс.	0,019	1,258
11	19	4194	1469,2	3,2	12463,8	0	12,5	5720,3	19247,3	1503,6	195,3	1656,6	10,918	14,048	3,720	6,564	6,682
12	20	1626,2	17,9	17,2	13738,0	271,7	124,9	3898,8	8813,8	380,2	177,4	3933,2	11,992	5,910	5,875	3,650	3,767
13	34	1352,2	6,7	18,0	23487,4	836,7	2236,9	6575,0	5977,5	900,1	1082,3	9560,3	19,060	23,857	15,045	7,165	7,206
14	7	216,8	1,4	9,5	5163,3	151,8	491,7	1578,5	1016,5	256,9	2129,2	2101,8	5,172	4,776	3,706	0,964	0,979

* «Макс.» означает, что объект сравнения останется эффективным при любом изменении входных параметров в соответствующей ЗМП.

Заключение

В работе предложена и описана новая методика системного анализа КП НСО на основе метода DEA. Описаны и представлены классификации НСО по источникам образования в нефтегазовой промышленности и методам переработки НСО. Приводится анализ основных системных проблем, присущих различным технологиям переработки отходов. Рассмотрены взаимосвязи элементов комплекса переработки, выявлены общесистемные свойства и закономерности, подтверждающие обоснованность подхода к исследованию КП НСО с позиций теории системного анализа.

Полученные результаты апробации методики для системы переработки НСО одного региона на примере решения двух задач оптимизации по критерию комплексной эффективности переработки отходов подтверждают возможность использования предлагаемого подхода на основе метода DEA и позволяют выбрать наилучшее решение по управлению процессом переработки в нефтегазовой промышленности.

Предложенная методика системного анализа на основе метода DEA может быть применена для широкого круга задач в других отраслях промышленности. Направлением будущих исследований может стать расширение количества используемых моделей метода DEA для проведения многофакторного анализа с целью увеличения точности анализа и обеспечения большей вариативности результирующих управленческих решений в системе информационной поддержки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 15-2021 «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов)». М.: Бюро НДТ, 2021.
2. Окружающая среда: официальная статистика. Отходы производства и потребления // Федеральная служба государственной статистики РФ. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 08.03.2024).
3. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 N 89-ФЗ.
4. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023. 686 с.
5. ГОСТ Р 56828.43-2018. Наилучшие доступные технологии. Утилизация и обезвреживание нефтесодержащих отходов. Показатели для идентификации (2018) // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ.
6. Characterization and treatment of oily sludge: A systematic review / H. Chen, X. Wang, H. Liang, B. Chen, Y. Liu, Z. Ma, Z. Wang // *Environmental Pollution*, 2024. Vol. 344. Characterization and treatment of oily sludge. P. 123245.
7. Characterization of oil component and solid particle of oily sludge treated by surfactant-assisted ultrasonication / Z. Lin, F. Xu, L. Wang, L. Hu, L. Zhu, J. Tan, Z. Li, T. Zhang // *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2021. T. 34. C. 53–60.
8. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // *Journal of Cleaner Production*, 2016. Vol. 114. A review on circular economy. Pp. 11–32.
9. Comprehensive characterization of an oily sludge from a petrol refinery: A step forward for its valorization within the circular economy strategy / S. Jerez, M. Ventura, R. Molina, M.I. Pariente, F. Martínez, J.A. Melero // *Journal of Environmental Management*, 2021. Vol. 285. P. 112124.
10. Circular economy potential and contributions of petroleum industry sludge utilization to environmental sustainability through engineered processes – A review / A.H. Jagaba, S.R.M. Kutty, I.M. Lawal, A.H. Birniwa, A.C. Affam, N.S.A. Yaro, A.K. Usman, I. Umaru, S. Abubakar, A. Noor, U.B. Soja, A.S. Yakubu // *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2022. Vol. 3. P. 100029.

11. *Vlachokostas Ch., Michailidou A.V., Achilles Ch.* Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. Vol. 138. P. 110563.
12. *Ягафарова Г.Г., Сафаров А.Х., Московец А.В.* [и др.] Отходы нефтегазового комплекса в дорожном строительстве // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2014. № 8. С. 9–11. EDN SJMXVV.
13. *Rheological modeling and microstructural evaluation of oily sludge modified bitumen / A.M. Memon, M.H. Sutanto, N.I.M. Yusoff, R.A. Memon, M.I. Khan, A.M. Al-Sabaei* // *Case Studies in Construction Materials*, 2023. Vol. 18. P. 02039.
14. *Тимрот С.Д., Гурьева Н.Л., Яманина Н.С.* Использование нефтесодержащих отходов в производстве керамзита // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2010. Т. 53. № 5. С. 117–118.
15. *Department of Civil and Environmental Engineering, Universiti Teknologi Petronas, Seri Iskandar, Malaysia, Et Al. K.* Review of petroleum sludge thermal treatment and utilization of ash as a construction material, a way to environmental sustainability // *International Journal of advanced and applied sciences*, 2020. Т. 7. N 12. С. 68–81.
16. *Яковлев С.И.* Создание экотехнопарка по безотходной утилизации нефтесодержащих отходов с получением технического грунта и котельных (печных) топлив // *Экологический вестник России*. 2020. № 4. С. 18–20.
17. *Ефимова С.Б., Калинина Е.В.* Оценка возможности использования остатков после пиролиза нефтесодержащих отходов в производстве керамических изделий // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2020. Т. 1. С. 83–87.
18. *Цокур О.С.* Повышение ресурсосбережения утилизацией нефтесодержащих отходов реагентным способом с получением экологически безопасных продуктов: специальность 03.02.08 «Экология (по отраслям)»: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2015. 22 с.
19. *Васильев А.В., Быков Д.Е., Пименов А.А.* Анализ особенностей и практические результаты экологического мониторинга загрязнения почвы нефтесодержащими отходами // *Изв. Самар. науч. центра РАН. Самара*. 2014. Т. 16. № 1(6). С. 1705–1708.
20. *Пименов А.А., Быков Д.Е., Васильев А.В.* О подходах к классификации отходов нефтегазовой отрасли и побочных продуктов нефтепереработки // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2014. № 4(44). С. 183–190.
21. *Гладышев Н.Г.* Научные основы рециклинга в техноприродных кластерах обращения с отходами: дис. ... д-ра техн. наук: 03.02.08 / ГОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет». Иваново, 2013.
22. *Десяткин А.А.* Разработка технологии утилизации нефтяных шламов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. Уфа, 2004. 24 с.
23. *Наркевич И.П.* Классификация промышленных отходов // *Химическая промышленность*. 1987. № 4. С. 51–54.
24. *Крапивский Е.И.* Нефешламы: уничтожение, утилизация, дезактивация. М.: Вологда: Инфра Инженерия, 2021. 432 с.
25. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (ред. от 02.11.2018) «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов» (с изм. и доп., вступ. в силу с 04.10.2021).
26. *Мазлова Е.А., Мецераков С.В.* Проблемы утилизации нефтешламов и способы их переработки. М.: Ноосфера, 2001. 56 с.
27. *Research progress of processing technology and characteristics of oily sludge / D.Y. Kang, H. Lin, D.P. Niu, G. Tian, R. Xu, Z.Y. Zhang, Y.J. Luo, Z.Z. Zhang* // *China Environ.* 2023. Sci. 43, 4106–4120. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2023.0132>.
28. *Mazlova E.A., Merisidi I.A.* Oil and Petroleum Spill Waste Management Problems // *Ecology and Industry of Russia*, 2020. Т. 24. № 12. С. 66–71.
29. *Oily sludge reduction in oil and gas gathering process / J. Zhang, Y. Jia, B. Liu, Z.J. Zhang, J. An, X.M. Cai* // *Chem. Ind. Eng. Prog.*, 2020, 39, 372–378. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1317>.
30. *Freeze-thaw method for oil recovery from waste cutting fluid without chemical additions / W. Feng, Y. Yin, M.De Lourdes Mendoza, L. Wang, X. Chen, Y. Liu, L. Cai, L. Zhang* // *Journal of Cleaner Production*, 2017. Vol. 148. Pp. 84–89.
31. *Cao R., Han D., Cao Z.* Study on the solidification and forming mechanism of oily sludge // *J. Petrochem. Univ.* 2022. 35. 9. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-396X.2022.02.002>.

32. The fate of total petroleum hydrocarbons during oily sludge composting: a critical review / *A. Aguelmous, L. El Fels, S. Souabi, M. Zamama, M. Hafidi* // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2019. Vol. 18. No. 3. Pp. 473–493.
33. Development in the biological treatment of oily sludge in oil and gas field / *Q.H. Bao, L.X. Huang, J.L. Xiu, L. Yu, Q.F. Cui, Y.D. Ma, L.N. Yi* // *Chem. Ind. Eng. Prog.* 2021. 40. 2762–2773. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1299>.
34. Свидетельство № 2019621436 Российская Федерация. База данных по отходам нефтегазового комплекса: свидетельство о государственной регистрации базы данных: / *Ю.Э. Плешивецца, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра*; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», № 2019621312; заявл. 29.07.2019; зарегистр. 08.08.2019. 1 с.
35. Свидетельство № 2019621435 Российская Федерация. База данных по технологиям утилизации отходов нефтегазового комплекса: свидетельство о государственной регистрации базы данных: / *Ю.Э. Плешивецца, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра*; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», № 2019621313; заявл. 29.07.2019; зарегистр. 08.08.2019. 1 с.
36. *Деревянов М.Ю., Каширских Д.В.* Алгоритм контроля качества данных об отходах нефтегазового комплекса // *Инновации и «зеленые» технологии: Региональная научно-практическая конференция: сборник материалов и докладов, Самара, 29 ноября 2017 года*. Самара: Вектор, 2018. С. 116–122.
37. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software. Data Envelopment Analysis. New York, NY: Springer US, 2007.
38. *Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.* Measuring the efficiency of decision making units // *European Journal of Operational Research*. 1978. Vol. 2. No. 6. Pp. 429–444.
39. *Banker R.D., Charnes A., & Cooper W.W.* Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis // *Management Science*, 1984. 30(9). 1078–1092. <http://www.jstor.org/stable/2631725>.
40. *Chen Y., Du J.* Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis // *Data Envelopment Analysis: International Series in Operations Research & Management Science*. Ed by J. Zhu. Boston, MA: Springer US, 2015. V. 221. Pp. 381–414.
41. Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method / *Yu.E. Pleshivtseva, M.Yu. Derevyanov, D.V. Kashirskikh, A.A. Pimenov, A.V. Kerov, V.K. Tyan* // *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*. 2018. No. 11. Pp. 139–144.
42. Simulation and Multi-Objective Evaluation of Reuse Potential of Waste Recycling System for Oil And Gas Industry / *M. Derevyanov, Y. Pleshivtseva, A. Afinogentov, A. Mandra, A. Pimenov* // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, Russia: IEEE. 2019. Pp. 429–434.
43. *Деревянов М.Ю., Плешивецца Ю.Э.* Анализ ресурсной ценности и ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе DEA-метода // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки*. 2022. № 4. С. 27–34.
44. *Деревянов 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. № 3. С. 65–75.
45. *Деревянов М.Ю.* Анализ показателей масштабирования при оценке ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе метода DEA // *Системы анализа и обработки данных*, 2023. № 3(91). С. 47–68.
46. *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. Pp. 186–193.
47. *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.
48. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622779 Российская Федерация. База данных для оптимизации сложноструктурированной системы комплексной переработки техногенных отходов нефтегазового комплекса: № 2021621717; заявл. 20.08.2021; опубли. 03.12.2021: / *Ю.Э. Плешивецца и др.*; заявитель и правообладатель

- тель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет».
49. Свидетельство № 2021664227 Российская Федерация. Оптимизация сложноструктурированной системы комплексной переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса: / Ю.Э. Плешивцева и др.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». № 2021663386; заявл. 24.08.2021; зарегистр. 01.09.2021. 1 с.
 50. Многокритериальная оптимизация комплексной переработки нефтесодержащих отходов по системным критериям качества / М.Ю. Деревянов, Ю.Э. Плешивцева, А.А. Афиногентов, А.Г. Мандра, А.А. Пименов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. № 30(3). С. 15–30.
 51. Multi-criteria optimization of the system for processing of technogenic waste of oil and gas enterprises / A. Afinogentov, M. Derevyanov, Yu. Pleshivtseva, A. Mandra // AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2910 (1). P. 020118.
 52. Application of Neural Networks to Assess the Resource Value of Oil-Contaminated Waste Storage Facilities / A.A. Afinogentov, Y.A. Bagdasarova, M.Y. Derevyanov, Y.E. Pleshivtseva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. No. 2. P. 022073.
 53. 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. Pp. 817–822.
 54. 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.

Статья поступила в редакцию 09 февраля 2024 г.

SYSTEM ANALYSIS OF STRUCTURED COMPLEX FOR OIL WASTES RECYCLING SYSTEM

M.Yu. Derevyanov*

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

Abstract. *A new approach to the system analysis of a structured complex of recycling (CR) of oil waste (OW) is proposed based on the Data Envelopment Analysis method, which allows solving the problem of choosing optimal processing technologies according to heterogeneous criteria of resource potential, environmental safety, resource and energy saving, and integrated efficiency. New classifications are presented: OW by sources of formation in the oil and gas industry and methods of recycling OW. An analysis of the systemic problems accompanying the technological processes of processing non-carbon dioxide has been carried out, which confirm the need to consider non-carbon dioxide storage facilities and technologies for their processing within a single system, consisting of two subsystems of disposal and processing. The system-wide properties of the OW CR and the interrelations of its main elements are analyzed, the presence of stable connections between the elements of the system and integrative qualities are revealed.*

A methodology for system analysis and optimization of the OW CR has been developed, consisting of 10 consecutive stages and including the development of databases and special software, multifactor analysis and optimization, the use of artificial neural networks to increase the speed of calculations, and the development of an information support system for making scientifically based management decisions.

The results of testing the methodology for analyzing the CR, consisting of 90 OW storage facilities and 14 processing technologies located within one region, are shown. The results of solving two problems of optimizing the non-carbon dioxide processing system according to the criterion of maximum comprehensive efficiency, taking into account constant and variable scale effects, were obtained.

The proposed approach can be extended to other regions of the Russian Federation with a developed oil and gas industry, where there is a need to take urgent measures to eliminate waste storage facilities and improve the environmental situation.

Keywords: *system analysis, recycling complex, oily waste, technology, classification, methodology, Data Envelopment Analysis, oil and gas industry*

REFERENCES

1. Informacionno-tekhnicheskij spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam ITS 15-2021 «Utilizaciya i obezvrezhivanie othodov (krome termicheskikh sposobov)» [Information and technical guide to the best available technologies ITS 15-2021 “Waste disposal and disposal (except thermal methods)”]. M.: Byuro NDT, 2021. (In Russian).
2. Okruzhayushchaya sreda: oficial'naya statistika. Othody proizvodstva i potrebleniya [Environment: official statistics. Industrial and consumption waste] // Federal State Statistics Service of the Russian Federation. <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (accessed March 08,2024) (In Russian).
3. Federal'nyj zakon «Ob othodah proizvodstva i potrebleniya» ot 24.06.1998 N 89-FZ. [Federal Law “On Production and Consumption Waste” dated June 24, 1998 N 89-FZ] (In Russian).
4. O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj Federacii v 2022 godu. Gosudarstvennyj doklad. [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022. State report.]. M.: Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2023. 686 p. (In Russian).

* Maksim Yu. Derevyanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

5. GOST R 56828.43-2018. Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Utilizatsiya i obezvezhivanie neftesoderzhashchih othodov. Pokazateli dlya identifikatsii [GOST R 56828.43-2018. Best available technology. Recycling and neutralization of oil-containing waste. Indicators for identification] (2018) // Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. M.: Standardinform. (In Russian).
6. Characterization and treatment of oily sludge: A systematic review / *H. Chen, X. Wang, H. Liang, B. Chen, Y. Liu, Z. Ma, Z. Wang* // *Environmental Pollution*. 2024. Vol. 344. Characterization and treatment of oily sludge. P. 123245.
7. Characterization of oil component and solid particle of oily sludge treated by surfactant-assisted ultrasonication / *Z. Lin, F. Xu, L. Wang, L. Hu, L. Zhu, J. Tan, Z. Li, T. Zhang* // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2021. T. 34. C. 53–60.
8. *Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S.* A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 114, A review on circular economy. Pp. 11–32.
9. Comprehensive characterization of an oily sludge from a petrol refinery: A step forward for its valorization within the circular economy strategy / *S. Jerez, M. Ventura, R. Molina, M.I. Pariente, F. Martínez, J.A. Melero* // *Journal of Environmental Management*, 2021. Vol. 285. P. 112124.
10. Circular economy potential and contributions of petroleum industry sludge utilization to environmental sustainability through engineered processes – A review / *A.H. Jagaba, S.R.M. Kutty, I.M. Lawal, A.H. Birniwa, A.C. Affam, N.S.A. Yaro, A.K. Usman, I. Umaru, S. Abubakar, A. Noor, U.B. Soja, A.S. Yakubu* // *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2022. Vol. 3. P. 100029.
11. *Vlachokostas Ch., Michailidou A.V., Achillas Ch.* Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. Vol. 138. P. 110563.
12. *Yagafarova G.G., Safarov A.Kh., Moskovets A.V.* [etc.] Othody neftegazovogo kompleksa v dorozhnom stroitel'stve [Waste from the oil and gas complex in road construction] // *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2014. No. 8. Pp. 9–11. (In Russian).
13. Rheological modeling and microstructural evaluation of oily sludge modified bitumen / *A.M. Memon, M.H. Sutanto, N.I.M. Yusoff, R.A. Memon, M.I. Khan, A.M. Al-Sabaeei* // *Case Studies in Construction Materials*, 2023. Vol. 18. P. e02039.
14. *Timrot S.D., Guryleva N.L., Yamanina N.S.* Ispol'zovanie neftesoderzhashchih othodov v proizvodstve keramzita [Use of oil-containing waste in the production of expanded clay] // *News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*. 2010. T. 53. No. 5. Pp. 117–118. (In Russian).
15. *Department of Civil and Environmental Engineering, Universiti Teknologi Petronas, Seri Iskandar, Malaysia, et al.*, a way to environmental sustainability // *International Journal of advanced and applied sciences*, 2020. T. 7. N 12. C. 68–81.
16. *Yakovlev S.I.* Sozдание ekotekhnoparka po bezothodnoj utilizatsii neftesoderzhashchih othodov s polucheniem tekhnicheskogo grunta i kotel'nyh (pechnykh) topliv [Creation of an eco-technopark for waste-free disposal of oil-containing waste with the production of technical soil and boiler (furnace) fuels] // *Ecological Bulletin of Russia*. 2020. No. 4. Pp. 18–20. (In Russian).
17. *Efimova S.B., Kalinina E.V.* Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya ostatkov posle piroliza neftesoderzhashchih othodov v proizvodstve keramicheskikh izdelij [Assessment of the possibility of using residues after pyrolysis of oil-containing waste in the production of ceramic products] // *Chemistry. Ecology. Urbanism*. 2020. T. 1. Pp. 83–87. (In Russian).
18. *Tsokur O.S.* Povyshenie resursosberezheniya utilizatsiej neftesoderzhashchih othodov reagentnym sposobom s polucheniem ekologicheskii bezopasnykh produktov [Increasing resource conservation by recycling oil-containing waste using a reagent method to obtain environmentally friendly products]: specialty 03.02.08 “Ecology (by industry)”: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Krasnodar, 2015. 22 p. (In Russian).
19. *Vasiliev A.V., Bykov D.E., Pimenov A.A.* Analiz osobennostej i prakticheskie rezul'taty ekologicheskogo monitoringa zagryazneniya pochvy neftesoderzhashchimi othodami [Analysis of features and practical results of environmental monitoring of soil pollution with oily waste] // *Izv. Samar. scientific center of the Russian Academy of Sciences*. 2014. Vol. 16. No. 1(6). Pp. 1705–1708. (In Russian).

20. *Pimenov A.A., Bykov D.E., Vasiliev A.V.* O podhodah k klassifikatsii othodov neftegazovoj otrasli i pobochnykh produktov neftepererabotki [On approaches to the classification of waste from the oil and gas industry and by-products of oil refining] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences, 2014, N 4(44). Pp. 183–190. (In Russian).
21. *Gladyshev N.G.* Nauchnye osnovy reciklinga v tekhnoprirodnnykh klasterah obrashcheniya s othodami [Scientific basis of recycling in techno-natural waste management clusters]. dis. ... Doctor of Technical Sciences: 02/03/08 / State Educational Institution of Higher Professional Education "Ivanovo State Chemical Technology University". Ivanovo, 2013. (In Russian).
22. *Desyatkin A.A.* Razrabotka tekhnologii utilizatsii neftyanykh shlamov [Development of technology for utilization of oil sludge: author's abstract]: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.17.07. Ufa, 2004. 24 p. (In Russian).
23. *Narkevich I.P.* Klassifikatsiya promyshlennykh othodov [Classification of industrial waste] // Chemical industry. 1987. No. 4. Pp. 51–54 (In Russian).
24. *Krapivskij E.I.* Nefteshlamy: unichtozhenie, utilizatsiya, dezaktivatsiya [Oil sludge: destruction, recycling, decontamination.]. M.: Vologda: Infra Engineering, 2021. 432 p. (In Russian).
25. Prikaz Rosprirodnadzora ot 22.05.2017 № 242 (red. ot 02.11.2018) «Ob utverzhdenii Federal'nogo klassifikatsionnogo kataloga othodov» (s izm. i dop., vstup. v silu s 04.10.2021) [Order of Rosprirodnadzor dated May 22. 2017. No. 242 (as amended on November 2, 2018) "On approval of the Federal Classification Catalog of Wastes" (with amendments and additions, entered into force on October 4, 2021)] (In Russian).
26. *Mazlova E.A., Meshcheryakov S.V.* Problemy utilizatsii nefteshlamov i sposoby ih pererabotki [Problems of oil sludge disposal and methods of their processing]. M.: Noosphere, 2001. 56 p. (In Russian).
27. Research progress of processing technology and characteristics of oily sludge / *D.Y. Kang, H. Lin, D.P. Niu, G. Tian, R. Xu, Z.Y. Zhang, Y.J. Luo, Z.Z. Zhang* // China Environ. 2023. Sci. 43. 4106–4120. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2023.0132>.
28. *Mazlova E.A., Merisidi I.A.* Oil and Petroleum Spill Waste Management Problems // Ecology and Industry of Russia. 2020. T. 24. № 12. C. 66–71.
29. Oily sludge reduction in oil and gas gathering process / *J. Zhang, Y. Jia, B. Liu, Z.J. Zhang, J. An, X.M. Cai* // Chem. Ind. Eng. Prog. 2020. 39. 372–378. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1317>.
30. *Feng W., Yin Y., De Lourdes Mendoza M., Wang L., Chen X., Liu Y., Cai L., Zhang L.* Freeze-thaw method for oil recovery from waste cutting fluid without chemical additions // Journal of Cleaner Production, 2017. Vol. 148. Pp. 84–89.
31. *Cao R., Han D., Cao, Z.* Study on the solidification and forming mechanism of oily sludge // J. Petrochem. Univ. 2022. 35. 9. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-396X.2022.02.002>.
32. The fate of total petroleum hydrocarbons during oily sludge composting: a critical review / *A. Aguelmous, L. El Fels, S. Souabi, M. Zamama, M. Hafidi* // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2019. Vol. 18. No. 3. Pp. 473–493.
33. Development in the biological treatment of oily sludge in oil and gas field / *Q.H. Bao, L.X. Huang, J.L. Xiu, L. Yu, Q.F. Cui, Y.D. Ma, L.N. Yi* // Chem. Ind. Eng. Prog. 2021. 40. Pp. 2762–2773. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1299>.
34. Svidetel'stvo № 2019621436 Rossijskaya Federaciya. Baza dannyh po othodam neftegazovogo kompleksa: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannyh [Certificate No. 2019621436 Russian Federation. Database on waste from the oil and gas complex: certificate of state registration of the database] / *Yu.E. Pleshivtseva, M.Yu. Derevyanov, A.G. Mandra*; applicant and copyright holder FSBEI HE Samara State. tech. univers. No. 2019621312; application 07/29/2019; registered 08.08.2019. P. 1 (In Russian).
35. Svidetel'stvo № 2019621435 Rossijskaya Federaciya. Baza dannyh po tekhnologiyam utilizatsii othodov neftegazovogo kompleksa: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannyh [Certificate No. 2019621435 Russian Federation. Database on waste disposal technologies of the oil and gas complex: certificate of state registration of the database]: / *Yu.E. Pleshivtseva, M.Yu. Derevyanov, A.G. Mandra*; applicant and copyright holder FSBEI HE Samara State. tech. univers. No. 2019621313; application 07/29/2019; registered 08.08.2019. P.1 (In Russian).
36. *Derevyanov M.Y., Kashirskih D.V.* Algoritm kontrolya kachestva dannyh ob othodah neftegazovogo kompleksa // Innovatsii i «zelenye» tekhnologii [Algorithm for quality control of data on waste from the oil and gas complex]: nnovations and “green” technologies: Regional scientific and practical conference: collection of materials and reports, Samara, November 29, 2017. Samara: Vector. 2018. Pp. 116–122. (In Russian).

37. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software. Data Envelopment Analysis. New York, NY: Springer US. 2007.
38. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units // European Journal of Operational Research, 1978. Vol. 2. No. 6. Pp. 429–444.
39. Banker R.D., Charnes A., & Cooper W.W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis // *Management Science*, 1984. 30(9). 1078–1092. <http://www.jstor.org/stable/2631725>.
40. Chen Y., Du J. Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis // Data Envelopment Analysis: International Series in Operations Research & Management Science. Ed by J. Zhu. Boston, MA: Springer US. 2015. V. 221. Pp. 381–414.
41. Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method / Yu.E. Pleshivtseva, M.Yu. Derevyanov, D.V. Kashirskikh, A.A. Pimenov, A.V. Kerov, V.K. Tyan // *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2018. No. 11. Pp. 139–144.
42. Simulation and Multi-Objective Evaluation of Reuse Potential of Waste Recycling System for Oil And Gas Industry / M. Derevyanov, Y. Pleshivtseva, A. Afinogentov, A. Mandra, A. Pimenov // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, Russia: IEEE. 2019. Pp. 429–434.
43. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E. Analiz resursnoy cennosti i resursnogo potentsiala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchih othodov na osnove DEA-metoda [Analysis of the resource value and resource potential of oily waste processing system facilities based on the DEA method] // *Izv. universities North Caucasus region. Tech. Sciences*. 2022. N 4. Pp. 27–34. (In Russian).
44. Derevyanov M.YU. Analiz resursnogo potentsiala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchih othodov s uchetom peremennogo effekta masshtaba [Analysis of the resource potential of oil-containing waste processing system facilities taking into account variable economies of scale] // *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer technology and information science*. 2023. N 3. Pp. 65–75 (In Russian).
45. Derevyanov M.YU. Analiz pokazatelej masshtabirovaniya pri ocenke resursnogo potentsiala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchih othodov na osnove metoda DEA [Analysis of scaling indicators when assessing the resource potential of oily waste processing system facilities based on the DEA method] // *Data Analysis and Processing Systems*. 2023. N 3(91). Pp. 47–68. (In Russian).
46. 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. Pp. 186–193.
47. 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.
48. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2021622779 Rossijskaya Federaciya. Baza dannyh dlya optimizacii slozhno-strukturirovannoj sistemy kompleksnoj pererabotki tekhnogennyh othodov neftegazovogo kompleksa [Certificate of state registration of the database No. 2021622779 Russian Federation. Database for optimizing a complex structured system for the integrated processing of industrial waste from the oil and gas complex]: No. 2021621717: application. 08/20/2021: publ. 12/03/2021: / Yu.E. Pleshivtseva and others; applicant and copyright holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Technical University". (In Russian).
49. Svidetel'stvo № 2021664227 Rossijskaya Federaciya. Optimizaciya slozhno-strukturirovannoj sistemy kompleksnoj pererabotki tekhnogennyh othodov predpriyatij neftegazovogo kompleksa [Certificate No. 2021664227 Russian Federation. Optimization of a complex structured system for complex processing of industrial waste from oil and gas enterprises] / Yu.E. Pleshivtseva and others; applicant and copyright holder FSBEI HE Samara State. tech. univers. No. 2021663386; application 08/24/2021; registered 09/01/2021. P. 1. (In Russian).
50. Derevyanov M.YU., Pleshivtseva YU.E., Afinogentov A.A., Mandra A.G., Pimenov A.A. Mnogokriterial'naya optimizaciya kompleksnoj pererabotki neftesoderzhashchih othodov po sistemnym kriteriyam kachestva [Multi-criteria optimization of complex processing of oil-containing waste according to system quality criteria] // *Vestnik Samarskogo*

- gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2022. № 30(3). C. 15–30.
51. Multi-criteria optimization of the system for processing of technogenic waste of oil and gas enterprises / *A. Afinogentov, M. Derevyanov, Yu. Pleshivtseva, A. Mandra* // AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2910 (1). P. 020118.
 52. Application of Neural Networks to Assess the Resource Value of Oil-Contaminated Waste Storage Facilities / *A.A. Afinogentov, Y.A. Bagdasarova, M.Y. Derevyanov, Y.E. Pleshivtseva* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. No. 2. P. 022073.
 53. *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. Pp. 817–822.
 54. *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.