

УДК 665.6/.7:502.171

## АНАЛИЗ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СИСТЕМЕ ПЕРЕРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ<sup>1</sup>

**М.Ю. Деревянов, Ю.Э. Плешивецца, А.А. Афиногентов, А.Г. Мандра**

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

E-mail: mder2007@mail.ru, yulia\_pl@mail.ru, pondex@yandex.ru, amandra@mail.ru

**Аннотация.** Проблемы экологической безопасности и ресурсосбережения при переработке промышленных отходов на предприятиях нефтегазовой отрасли России становятся все более значимыми, особенно в условиях существующих тенденций, ориентированных на декарбонизацию и устойчивое развитие. Рост промышленных отходов не компенсируется соответствующим ростом объемов и качества переработки, поскольку перерабатывается только 10 % нефтесодержащих отходов, а остальная часть подвергается захоронению или сжиганию, что оказывает дополнительное вредное воздействие на окружающую среду. В статье предлагается новый подход к многофакторному анализу ресурсосбережения и экологической безопасности при комплексной переработке промышленных отходов нефтегазовых предприятий для достижения целей устойчивого развития. Разработанный авторами алгоритм, теоретической основой которого является метод анализа оболочки данных (DEA), определяет последовательность решения взаимосвязанных задач многофакторного сравнения объектов системы переработки отходов по разнородным критериям качества: ресурсной ценности, ресурсному потенциалу, ресурсосбережению и экологической безопасности. Эти задачи формулируются на основе модели суперэффективности метода DEA как задачи математического программирования. Представленный и апробированный подход к многофакторному анализу ресурсосбережения и экологической безопасности системы переработки отходов позволяет: 1) получать и анализировать относительные сравнительные оценки объектов хранения отходов и технологий переработки по разнородным критериям качества; 2) формировать локальные и общие стратегии принятия решений, обеспечивающие достижение целей устойчивого развития. Проведенный анализ позво-

---

 © Автор(ы), 2024

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема No FSSE-2024-0014) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Максим Юрьевич Деревянов, кандидат технических наук, доцент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Юлия Эдгаровна Плешивецца, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Александр Александрович Афиногентов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры трубопроводного транспорта.

Андрей Геннадьевич Мандра, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах.

*ляет считать перспективным множественное применение представленных результатов в различных нефтеносных регионах Российской Федерации, где рост образования промышленных отходов имеет тяжелые и необратимые экологические последствия.*

**Ключевые слова:** *промышленные отходы, ресурсная ценность, ресурсный потенциал, ресурсосбережение, экологическая безопасность, многофакторный анализ, Data Envelopment Analysis, нефтегазовый комплекс.*

## **Введение**

По объемам добычи нефти и газа Россия входит в лидирующую тройку стран мира вместе с США и Саудовской Аравией, а нефтегазовый комплекс (НГК) РФ занимает ключевую позицию по влиянию на экономику страны. Однако географические особенности России, отстающее от передовых стран технологическое оснащение мест добычи и переработки, а также отсутствие норм и правил бережного отношения к ресурсам на предприятиях НГК и недостаточно развитая культура обращения с промышленными отходами (ПО) не позволяют добиться в ближайшей перспективе целей устойчивого развития [1].

В процессе добычи, транспортировки и переработки углеводородов потери нефти и нефтепродуктов в виде нефтесодержащих отходов (НСО), которые относятся к ПО, ежегодно составляют от 6 до 8 млн т [2, 3]. Низкий уровень переработки ПО в России (около 10 %) по сравнению с лидирующими европейскими странами, в которых уровень переработки достигает 90 %, приводит к стремительному росту накопления отходов. Накопленный объем таких отходов удваивается каждые 5–7 лет, а возникающие при этом экологические проблемы становятся критическими и требуют срочного решения. Кроме того, значительную часть производственного цикла переработки ПО составляют энерго- и ресурсоемкие технологические процессы, негативно влияющие на окружающую среду [4].

В соответствии с установившимися тенденциями устойчивого развития и декарбонизации в отрасли обращения с отходами происходит переход от концепции управления отходами к концепции управления ресурсами в рамках экономики замкнутого цикла (ЭЗЦ) [5]. ЭЗЦ направлена на повышение эффективности использования ресурсов и внедрение производственных моделей замкнутого цикла, а особое внимание в ней уделяется промышленным отходам для достижения наилучшего баланса между целями экономики, защитой окружающей среды и интересами общества [6–8]. В некоторых европейских странах введены ограничения на захоронение определенных материалов, которые послужили стимулом для поиска более рационального использования ПО в концепции ЭЗЦ [9].

Эффективность обращения с ПО в рамках ЭЗЦ определяется ценностью ресурсов, полученных из отходов. Ресурсная ценность может рассматриваться как комплексный количественный критерий, отражающий содержание ценных для вторичной переработки ресурсов и оцениваемый по совокупности разнородных показателей: содержанию «полезных» углеводородов и «вредных» механических и минеральных примесей, серы, асфальтенов, загрязненной воды [10, 11]. При использовании альтернативной оценки ресурсной ценности [12] применяются экологические показатели, которые включают выбросы углерода [13] и загрязняющие вещества в воздухе, воде и почве [14, 15], энергетические [16], социальные, экономические и интегральные показатели эффективности [17], повышение которых является актуальной задачей.

Ресурсная ценность может учитываться при определении ресурсного потенциала отходов [11, 18, 19], который является комплексным количественным показателем ресурсосберегающего эффективного вторичного использования отходов после рекуперации, регенерации и(или) рециклинга. Одновременно с ресурсным потенциалом отходов может определяться ресурсный потенциал технологий переработки, который является комплексным количественным показателем ресурсосбережения с учетом ресурсной ценности ПО.

Эффективность и экологическая безопасность системы переработки отходов НГК [20] может быть оценена путем проведения многофакторного анализа на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA) [21]. Однако предложенный подход не учитывает потенциал ресурсосбережения в системе переработки отходов, что уменьшает эффективность использования ресурсов и возможность достижения уровня «нулевых» отходов.

Для достижения целей устойчивого развития экономики и ее декарбонизации необходимо пересмотреть подходы к принятию решений в области обращения ПО с позиций максимального ресурсосбережения и экологической безопасности.

В статье предлагается новый подход к анализу ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки ПО предприятий НГК на основе DEA-метода. Основным его отличием от известных подходов [22, 23] является одновременный учет ресурсной ценности отходов, ресурсного потенциала и экологической безопасности в системе переработки отходов. Результаты многофакторного анализа могут быть использованы в системе поддержки принятия решений, что позволит эффективно использовать ресурсы и снизить вредное влияние процессов переработки ПО на окружающую среду.

В статье представлен разработанный алгоритм многофакторного анализа ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки ПО и результаты апробации предлагаемого подхода на примере системы переработки НСО, включающей 14 технологий и 90 хранилищ НСО.

### Многофакторный анализ на основе модели Super-Efficiency DEA-метода

Основу предлагаемого в статье подхода составляет известная модель Super-Efficiency DEA-метода [24], которая позволяет определить наилучший объект сравнения в анализируемой группе.

Сравнение  $Z$  объектов по показателю эффективности  $S_z$ ,  $z = \overline{1, Z}$  приводит к формулировке задачи поиска максимума целевой функции

$$S_z(X_z, Y_z) = \frac{\sum_{j=1}^J \bar{u}_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H \bar{v}_{iz} x_{iz}} \rightarrow \max_{\bar{U}, \bar{V} \in G} \quad (1)$$

при условии

$$\frac{\sum_{j=1}^J \bar{u}_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H \bar{v}_{iz} x_{iz}} \leq 1 \forall \left( \begin{array}{l} z = \overline{1, Z}; z \neq k; j = \overline{1, J}; \\ i = \overline{1, H}; \bar{u}_{jz} > 0; \bar{v}_{iz} > 0 \end{array} \right), \quad (2)$$

где  $\bar{U} = (\bar{u}_{jz})$ ,  $j = \overline{1, J}$ ;  $\bar{V} = (\bar{v}_{iz})$ ,  $i = \overline{1, H}$  – весовые коэффициенты, которые ха-

рактизируют относительный вклад в оценку  $S_z$  каждого из выходов  $y_{jz}$ ,  $j = \overline{1, J}$ , положительно влияющих на оценку  $S_z$ , и каждого из входов  $x_{iz}$ ,  $i = \overline{1, H}$ , отрицательно влияющих на оценку  $S_z$ , соответственно.

Размерность векторов входных  $X = (x_{iz})$ ,  $i = \overline{1, H}$  и выходных  $Y = (y_{jz})$ ,  $j = \overline{1, J}$  параметров определяется числом учитываемых в сравнительном анализе значимых факторов и существованием потенциальной возможности определения их численных значений для всех объектов сравнения.

Векторы весовых коэффициентов в задаче математического программирования (ЗМП) (1), (2) являются неизвестными, за исключением коэффициентов  $\bar{u}_{jk}$  и  $\bar{v}_{ik}$ , которые получены на основе решения ЗМП по базовой CCR модели DEA-метода [23] для выходных и входных параметров  $k$ -го объекта сравнения соответственно, с максимальным значением оценки эффективности  $F_k = 1$ ;  $k$  – порядковый номер объекта сравнения со значением оценки  $F_k = 1$ ,  $k = \overline{1, P}$  в анализируемой группе из  $Z$  объектов, которые исключаются из ограничения (2), где  $P$  – число объектов сравнения со значением оценки эффективности  $F_k = 1$ .

Результатом решения ЗМП (1), (2) являются относительные оценки эффективности  $S_z$ ,  $z = \overline{1, Z}$ , значения которых изменяются в интервале  $(0, \infty)$ . Объект, имеющий максимальную оценку  $S_z$  относительно целевой функции (1), считается наилучшим в анализируемой группе по выбранным параметрам сравнения.

На основе последовательного решения ЗМП (1), (2) для различных параметров сравнения с учетом поставленных целей анализа и полученных относительных оценок эффективности  $S_z$  формируется алгоритм многофакторного анализа, который позволяет определять базовые решения по управлению системой переработки НСО.

### **Алгоритм многофакторного анализа ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки промышленных отходов**

Описанный выше подход был распространен авторами на новую предметную область актуальных инженерных приложений, связанных с проблемами переработки нефти [20], нефтесодержащих [25] и техногенных отходов [26].

Основой рассматриваемого в статье алгоритма анализа объектов системы переработки НСО (рис. 1), включающего 6 последовательных этапов, является разработанная авторами методика последовательного решения взаимосвязанных задач многофакторного сравнения объектов по разнородным критериям качества, отличающихся новыми формулировками сопутствующих ЗМП. В качестве объектов сравнения рассматриваются хранилища НСО и технологии их переработки.

На первом этапе осуществляется сбор и обработка информации на основе разработанных принципов классификации, систематизации и анализа ее качества (полнота, точность, достоверность, актуальность, согласованность). Обработанная информация в виде характеристик объектов системы переработки НСО является исходной для решения ЗМП 1, 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2 (см. рис. 1).

На втором этапе решается задача анализа ресурсной ценности отходов в  $N$  хранилищах системы переработки НСО (ЗМП 1), сформулированная в виде (1), (2) [10]. Основными входными параметрами, уменьшающими ресурсную цен-

ность НСО в хранилищах, являются удельное содержание воды, асфальтенов и смол, механических и минеральных примесей, серы (входы 1–4 на рис. 1) Выходными параметрами, характеризующими ресурсную ценность НСО в хранилищах, являются средневзвешенное содержание светлых углеводов и отношение массы светлых углеводов к суммарной массе вредных примесей и воды (выходы 5–6, рис. 1). Результатом решения ЗМП 1 в виде (1), (2) являются относительные оценки  $S_n^1$ ,  $n = \overline{1, N}$  ресурсной ценности НСО. Наибольшую ресурсную ценность в анализируемой группе из  $N$  хранилищ имеют отходы, содержащиеся в  $n$ -ом хранилище и имеющие максимальную оценку  $S_n^1$ , которая показывает степень пригодности отходов к использованию в качестве материальных ресурсов для дальнейшей переработки.

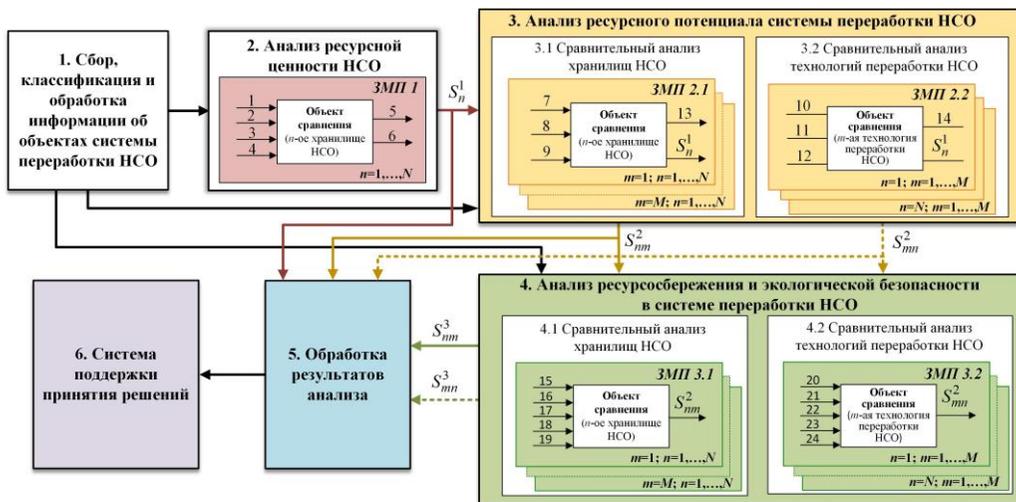


Рис. 1. Алгоритм многофакторного анализа ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки НСО

На третьем этапе определяется ресурсный потенциал для двух видов объектов сравнения в анализируемой системе переработки НСО: хранилищ (ЗМП 2.1) и технологий переработки НСО (ЗМП 2.2) [18].

Ресурсный потенциал  $n$ -го хранилища характеризует комплексный количественный показатель возможности эффективного вторичного использования содержащихся в нем отходов при их переработке с помощью применения конкретной технологии. Ресурсный потенциал  $m$ -ой технологии характеризует степень эффективности ее применения для вторичной переработки отходов в определенном хранилище.

Задачи анализа ресурсного потенциала системы переработки НСО (ЗМП 2.1 и 2.2) также формулируются в виде (1), (2). Входными параметрами являются длительность переработки отходов, масса реагентов и расход энергии (топлива) (входы 7–9 и 10–12 на рис. 1). Выходными параметрами являются масса полезных продуктов рециклинга (выходы 13 и 14, см. рис. 1) и оценка  $S_n^1$ ,  $n = \overline{1, N}$  ресурсной ценности хранилища НСО, полученная на основе решения ЗМП 1 на втором этапе.

Решение ЗМП 2.1 позволяет определить относительные оценки  $S_{nm}^2$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $m = \overline{1, M}$  ресурсного потенциала  $n$ -го хранилища при переработке находящихся в нем отходов с помощью  $m$ -ой технологии. Анализ оценок  $S_{nm}^2$  ресурсного потенциала позволяет выявить, какое из  $N$  хранилищ в анализируемой системе обладает наибольшим ресурсным потенциалом при применении  $m$ -ой из  $M$  технологий переработки. Аналогично в результате решения ЗМП 2.2 определяются относительные оценки  $S_{nm}^2$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $n = \overline{1, N}$  ресурсного потенциала  $m$ -ой технологии для переработки НСО в  $n$ -ом хранилище. Анализ оценок  $S_{nm}^2$  ресурсного потенциала позволяет выявить наилучшую  $m$ -ую технологию для переработки отходов в каждом  $n$ -ом из  $N$  анализируемых хранилищ в рассматриваемой системе переработки НСО.

На четвертом этапе решаются комплексные задачи многофакторного анализа ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки ПО для двух типов объектов анализируемой системы: хранилищ и технологий переработки НСО (ЗМП 3.1 и ЗМП 3.2 на рис. 1). Ресурсосбережение в системе переработки НСО заключается в эффективном и экономном использовании ресурсов при переработке с учетом ресурсного потенциала отходов и применяемой для их переработки технологии. Экологическая безопасность в системе переработки НСО достигается за счет минимизации вредных для окружающей среды выбросов и объемов непереработанных отходов.

Входными параметрами являются валовые выбросы парниковых газов, сернистого ангидрида и сажи, масса непереработанной части минеральных и механических примесей и образовавшейся загрязненной воды в процессе вторичной переработки (входы 15–19 и 20–24 на рис. 1). Выходными параметрами являются оценки  $S_{nm}^2$  и  $S_{nm}^2$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $n = \overline{1, N}$  ресурсного потенциала, полученные в результате решения ЗМП 2.1 и ЗМП 2.2 соответственно.

В результате решения ЗМП 3.1, сформулированной в виде (1), (2), определяются относительные комплексные многофакторные оценки  $S_{nm}^3$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $n = \overline{1, N}$  ресурсосбережения и экологической безопасности при переработке отходов в анализируемых хранилищах системы. Анализ комплексных оценок  $S_{nm}^3$  позволяет выявить наилучшее  $n$ -ое хранилище, переработка НСО в котором с помощью каждой  $m$ -ой из анализируемой группы  $M$  технологий осуществляется с максимальным ресурсосбережением и экологической безопасностью в системе.

Аналогично в результате решения ЗМП 3.2, сформулированной в виде (1)–(2), определяются относительные комплексные многофакторные оценки  $S_{nm}^3$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $n = \overline{1, N}$  ресурсосбережения и экологической безопасности при использовании  $m$ -ой технологии для переработки НСО в каждом  $n$ -ом хранилище. Анализ комплексных оценок  $S_{nm}^3$  позволяет выявить наилучшую  $m$ -ую технологию для переработки НСО в каждом  $n$ -ом из  $N$  хранилищ с максимальным ресурсосбережением и экологической безопасностью в системе переработки.

На пятом этапе алгоритма происходит обработка полученных результатов многофакторного анализа и передача информации в систему поддержки принятия решений (шестой этап).

## Результаты

В результате применения разработанного алгоритма проведен многофакторный анализ системы переработки НСО, включающей  $N = 90$  хранилищ нефтесодержащих жидких отходов ( $n = \overline{1,8}$  – нефтешламовые амбары;  $n = \overline{9,23}$  – илонакопители;  $n = \overline{24,59}$  – нефтеловушки;  $n = \overline{60,84}$  – шламонакопители;  $n = \overline{85,90}$  – обвалование свечей аварийного сброса) и  $M = 14$  потенциально возможных технологий их переработки (см. таблицу), расположенных в пределах одного региона Российской Федерации.

### Характеристики технологий переработки жидких НСО

<i>m</i>	Название технологии (установки)	Метод/Способ переработки	Производительность (по паспорту)	Наименование продукта вторичной переработки
1	МегаМакс	Физико-химический метод / рекуперация	7–15 м <sup>3</sup> /ч	Нефть
2	Минералоль	Пиролиз с рекуперацией	2 м <sup>3</sup> /ч	Нефть, сухой остаток
3	СОМРЕХ НТР 2,2	Пиролиз	0,2 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
4	СОМРЕХ НТР 20	Пиролиз	2–2,3 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
5	Holo-Scru 10	Термический метод / рекуперация	0,1–20 м <sup>3</sup> /ч	Нефть
6	Electric-Scru 10	Термический метод / рекуперация	0,1–20 м <sup>3</sup> /ч	Нефть
7	Установка пиролиза Фортан – 4	Метод полунепрерывного пиролиза жидкого сырья	0,1–0,5 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
8	Установка пиролиза Фортан – 20	Метод полунепрерывного пиролиза жидкого сырья	0,5–2,5 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
9	Фортан ТМ 200	Термический метод / рекуперация	5,2–36 м <sup>3</sup> /ч	Жидкое печное топливо, технический углерод, газ
10	ПУ-01	Технология обезвреживания НСО методом реагентного капсулирования	2 м <sup>3</sup> /ч	Зола, горячая вода, пар, электроэнергия
11	УПБШ-10С/УПБШ-10СД	Физико-химический метод / рекуперация	10–15 м <sup>3</sup> /ч	Грунтово-шламовая смесь для отсыпки дорог 3-й категории
12	УОГ-15-В2ГЦ2-10	Физико-химический метод / рекуперация	15–20 м <sup>3</sup> /ч	Нефть
13	Есо-TechRecOil Oy	Физико-химический метод	30–50 м <sup>3</sup> /ч	Товарный нефтепродукт
14	ИнноТек	Физико-химический метод / рекуперация	0,3–0,35 т/ч	Жидкое печное топливо, зола

Результаты решения ЗМП 1, 2.1 и 3.1 представлены на рис. 2 в виде оценок  $S_n^1$  ресурсной ценности,  $S_{n2}^2$  ресурсного потенциала, а также комплексных многофакторных оценок  $S_{n2}^3$  ресурсосбережения и экологической безопасности при применении технологии № 2 (Минералоль) для переработки отходов в анализируемых  $n = \overline{1,90}$  хранилищах системы соответственно.

Технология № 2 выбрана для демонстрации результатов расчетов, поскольку она имеет максимальную оценку  $S_{52}^3 = 2.7$  ресурсосбережения и экологической безопасности переработки отходов в хранилище № 5 среди всех анализируемых хранилищ и технологий системы переработки НСО. На рис. 2 показаны ранжированные оценки  $S_{n2}^3$  для 10 наилучших и 10 наихудших хранилищ с учетом переработки накапливаемых в них отходов с помощью технологии № 2.

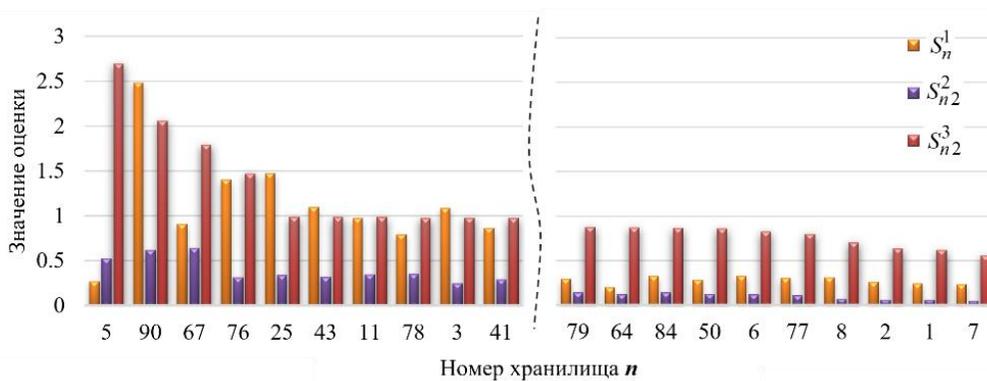


Рис. 2. Оценки ресурсной ценности, ресурсного потенциала, ресурсосбережения и экологической безопасности при переработке технологией № 2 отходов в хранилищах системы

Анализ результатов расчета оценок, представленных на рис. 2, показал, например, что для хранилища № 90, имеющего максимальную ресурсную ценность в анализируемой системе переработки с оценкой  $S_{90}^1 = 2.48$ , ресурсный потенциал имеет невысокое значение  $S_{902}^2 = 0.62$ , но по оценке  $S_{902}^3 = 2.06$  ресурсосбережения и экологической безопасности хранилище № 90 при переработке технологией № 2 занимает 2-е место в группе (см. рис. 2).

Результаты решения ЗМП 2.2 и 3.2 представлены на рис. 3 в виде оценок  $S_{n2}^2$  ресурсного потенциала и ранжированных комплексных многофакторных оценок  $S_{n2}^3$  ресурсосбережения и экологической безопасности различных технологий при переработке отходов в хранилище № 5. Выбор хранилища № 5 для демонстрации результатов расчетов связан с тем, что оценки в системе переработки, полученные по результатам решения всех ЗМП, входящих в алгоритм (см. рис. 1), являются максимальными для этого хранилища и технологий, применяемых для переработки НСО в нем ( $S_{52}^3 = S_{25}^3 = 2.7$ ).

Представленные на рис. 2 и 3 оценки имеют значение для принятия локальных решений для управления системой переработки НСО и позволяют определить оптимальные пары «хранилище НСО – технология переработки» по крите-

рию ресурсосбережения и экологической безопасности. Для принятия комплексных управленческих решений, когда необходимо оценить эффективность переработки всей системы, можно использовать анализ обобщенных оценок  $SN_m^3$  ресурсосбережения и экологической безопасности технологий для  $N$  хранилищ в составе системы переработки:

$$SN_m^3 = \sum_{n=1}^N S_{mn}^3, \quad m = \overline{1, M}. \quad (3)$$

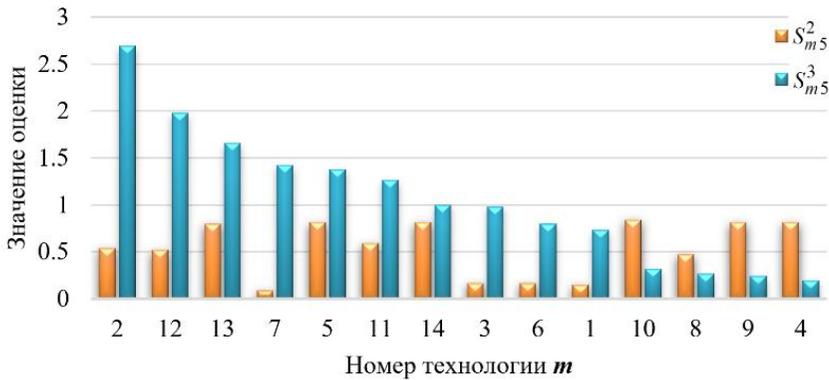


Рис. 3. Оценки ресурсного потенциала, ресурсосбережения и экологической безопасности технологий при переработке отходов в хранилище № 5

На рис. 4 представлены результаты анализа решений ЗМП 3.2 в виде ранжированных обобщенных оценок  $SN_m^3$  ресурсосбережения и экологической безопасности технологий переработки отходов для всех  $N=90$  хранилищ.

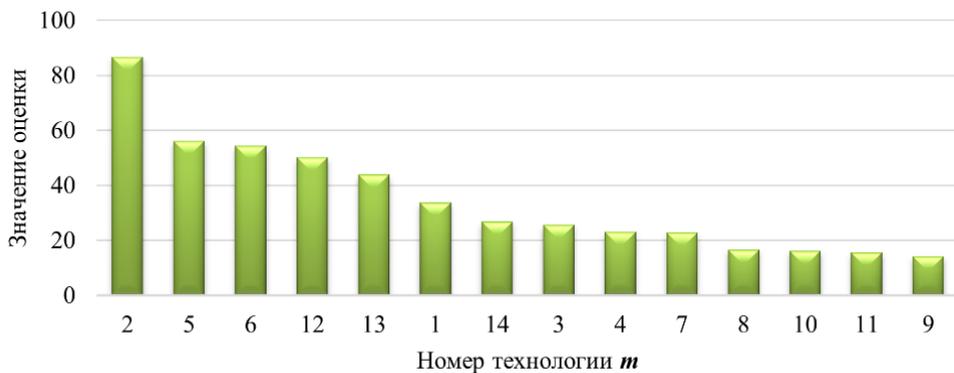


Рис. 4. Обобщенные оценки  $SN_m^3$  ресурсосбережения и экологической безопасности технологий при переработке всех отходов в системе

Анализ полученных результатов (см. рис. 4) свидетельствует о высокой эффективности технологии № 2 с максимальной обобщенной оценкой  $SN_2^3 = 86.65$  в системе, обеспечивающей максимальное ресурсосбережение и экологическую безопасность при переработке отходов во всех хранилищах.

## Заключение

Представленная статья продолжает направление исследований по системному анализу и многофакторному оцениванию эффективности функционирования систем переработки промышленных отходов с использованием DEA-метода по разнородным критериям качества (ресурсная ценность [10], ресурсный потенциал [11, 18, 23], экологическая безопасность [27]).

Данный подход распространяется в статье на задачи многофакторного анализа ресурсосбережения и экологической безопасности системы переработки промышленных отходов предприятий НГК, сформулированные на основе модели суперэффективности DEA-метода. Для реализации предлагаемого подхода разработан соответствующий алгоритм и проведена его апробация на существующей системе переработки НСО в отдельном регионе РФ. Полученные относительные оценки ресурсной ценности хранилищ отходов, ресурсного потенциала, ресурсосбережения и экологической безопасности позволяют провести многофакторный анализ разнородных сравнительных параметров функционирования системы переработки без введения дополнительных удельных, усредненных или масштабирующих коэффициентов, что является весомым преимуществом DEA-метода перед альтернативными методами многокритериального сравнения.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования результатов анализа в системе поддержки принятия решений на локальном и стратегическом уровне управления, что позволит приблизить выполнение целей устойчивого развития экономики РФ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. United Nations Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: draft resolution referred to the United Nations summit for the adoption of the post-2015 development agenda by the General Assembly at its 69th session. 2015. 35 p.
2. Трубникова Е. 7,75 млрд тонн: в России установлен абсолютный рекорд по образованию производственных отходов. 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2020/record-proizvodstv-otkhod/> (дата обращения: 11.10.2024).
3. Окружающая среда. Отходы производства и потребления // Федеральная служба государственной статистики РФ [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 21.04.2024).
4. Мхитаров П.А. Технологии и оборудование для переработки отходов нефтепереработки, нефтешламов и загрязненных углеводородами грунтов // Нефть. Газ. Новации. 2013. No. 10. С. 72–76.
5. Ashby M.F. The Vision // Materials and Sustainable Development. Elsevier, 2016. Pp. 211–239.
6. 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. Pp. 11–32.
7. Velenturf A.P.M., Purnell P. Principles for a sustainable circular economy // Sustainable Production and Consumption. 2021. Vol. 27. Pp. 1437–1457.
8. Achi C.G., Snyman J., Ndambuki J.M., Kupolati W.K. Advanced Waste-to-Energy Technologies: A Review on Pathway to Sustainable Energy Recovery in a Circular Economy // Nature Environment and Pollution Technology. 2024. Vol. 23. No. 3. Pp. 1239–1259.
9. Mohamed Sultan A.A., Mativenga P.T. Sustainable Location Identification Decision Protocol (SuLIDeP) for determining the location of recycling centres in a circular economy // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 223. Pp. 508–521.
10. Pleshivtseva Yu.E., Derevyanov M.Yu., Kashirskikh D.V., Pimenov A.A., Kerov A.V., Tyun V.K. Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method // Нефтяное хозяйство – Oil Industry. 2018. No. 11. Pp. 139–144.
11. 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.
12. *Iacovidou E., Velis C.A., Purnell P., Zwirner O., Brown A., Hahladakis J., Millward-Hopkins J., Williams P.T.* Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 166. Pp. 910–938.
  13. *Christensen T.H., Gentil E., Boldrin A., Larsen A.W., Weidema B.P., Hauschild M.* C balance, carbon dioxide emissions and global warming potentials in LCA-modelling of waste management systems // *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. 2009. Vol. 27. No. 8. Pp. 707–715.
  14. *Allegrini E., Vadenbo C., Boldrin A., Astrup T.F.* Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash // *Journal of Environmental Management*. 2015. Vol. 151. Pp. 132–143.
  15. *Hu G., Feng H., He P., Li J., Hewage K., Sadiq R.* Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 251. Pp. 119594.
  16. *Puig R., Fullana-i-Palmer P., Baquero G., Riba J.-R., Bala A.* A Cumulative Energy Demand indicator (CED), life cycle based, for industrial waste management decision making // *Waste Management*. 2013. Vol. 33. No. 12. Pp. 2789–2797.
  17. *Fang K., Heijungs R., De Snoo G.R.* Understanding the complementary linkages between environmental footprints and planetary boundaries in a footprint–boundary environmental sustainability assessment framework // *Ecological Economics*. 2015. Vol. 114. Pp. 218–226.
  18. *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: IEEE, 2019. Pp. 429–434.
  19. *Derevyanov M.* Analysis of the resource value and resource potential of the objects of the oil-contaminated wastes recycling system based on the DEA method // *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*. 2022. No. 4. Pp. 27–34.
  20. *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. Pp. 1207–1212.
  21. *Charnes A., Cooper W.W., Lewin A.Y., Seiford L.M.* Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications. Data Envelopment Analysis. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994. 513 p.
  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., Пleshivtseva 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. № 29 (1). С. 19–35.
  24. *Chen Y., Du J.* Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis // *Data Envelopment Analysis: International Series in Operations Research & Management Science*. Ed. J. Zhu. Boston, MA: Springer US, 2015. Vol. 221. Pp. 381–414.
  25. *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.
  26. *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. Pp. 012023.
  27. *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” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Grozny, Russia: Atlantis Press, 2019. Vol. 1. Pp. 33–38.

*Статья поступила в редакцию 15.08.2024 г.*

# ANALYZING RESOURCE SAVING AND ENVIRONMENTAL SAFETY IN OIL AND GAS WASTE PROCESSING SYSTEM TO PROVIDE SUSTAINABLE DEVELOPMENT<sup>1</sup>

**M. Yu. Derevyanov, Yu.E. Pleshivtseva, A.A. Afinogentov, A.G. Mandra**

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

E-mail: mder2007@mail.ru, yulia\_pl@mail.ru, pondex@yandex.ru, amandra@mail.ru

**Abstract.** *The problems of environmental safety and resource conservation in the processing of industrial waste at Russian oil and gas enterprises are becoming more and more significant, especially in the context of current trends focused on decarbonization and sustainable development. The growth of industrial waste is not compensated by the corresponding growth in the volume and quality of processing, since only 10% of oily waste is processed, and the rest is buried or incinerated, which has an additional harmful impact on the environment. The article proposes a new approach to multifactor analysis of resource conservation and environmental safety in the integrated processing of industrial waste from oil and gas enterprises to achieve sustainable development goals. The algorithm developed by the authors, the theoretical basis of which is the method of data envelopment analysis (DEA), determines the sequence of solving interrelated problems of multifactor comparison of objects of the waste processing system by heterogeneous quality criteria: resource value, resource potential, resource saving and environmental safety. These problems are formulated on the basis of the super-efficiency model of the DEA method as a mathematical programming problem. The presented and tested approach to multifactor analysis of resource conservation and environmental safety of the waste treatment system allows: (1) to obtain and analyze relative comparative assessments of waste storage facilities and technologies regarding heterogeneous quality criteria, and (2) forming local and general decision-making strategies that provide sustainable development goals. The proposed approach appears promising for multiple prospective applications in the oil-bearing regions of the Russian Federation, where the growth in the formation of industrial waste has severe and irreversible environmental consequences.*

**Keywords:** *industrial waste, resource value, resource potential, resource saving, environmental safety, multivariate analysis, Data Envelopment Analysis, oil and gas complex.*

## REFERENCES

1. United Nations Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: draft resolution referred to the United Nations summit for the adoption of the post-2015 development agenda by the General Assembly at its 69th session. 2015. 35 c.
2. Trubnikova E. 7,75 mlrd tonn: v Rossii ustanovlen absolyutnyj rekord po obrazovaniyu proizvodstvennyh othodov [7.75 billion tons: Russia has set an absolute record for the generation of industrial waste]. 2020. URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2020/rekord-proizvodstv-otkhod/> (accessed: 11.10.2024). (In Russian).



© The Author(s), 2024

<sup>1</sup> *The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSSE-2024-0014) as part of the state task of the Samara State Technical University.*

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

*Yuliya E. Pleshivtseva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

*Aleksandr A. Afinogentov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

*Andrey G. Mandra (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

3. Okruzhayushchaya sreda: oficial'naya statistika. Othody proizvodstva i potrebleniya [Environment: official statistics. Industrial and consumption waste] // Federal State Statistics Service of the Russian Federation. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (accessed: 21.04.2024). (In Russian)
4. *Mkhitarov R.A.* Tekhnologii i oborudovanie dlya pererabotki othodov neftepererabotki, nefteshlamov i zagryaznennykh uglevodorodami gruntov [Technologies and equipment for processing oil refining waste, oil sludge and hydrocarbon-contaminated soils] // Journal Oil. Gas. Innovations. 2013. No. 10. Pp. 72–76. (In Russian)
5. *Ashby M.F.* The Vision // Materials and Sustainable Development. Elsevier, 2016. Pp. 211–239.
6. *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. Pp. 11–32.
7. *Velenturf A.P.M., Purnell P.* Principles for a sustainable circular economy // Sustainable Production and Consumption, 2021. Vol. 27. Pp. 1437–1457.
8. *Achi C.G., Snyman J., Ndambuki J.M., Kupolati W.K.* Advanced Waste-to-Energy Technologies: A Review on Pathway to Sustainable Energy Recovery in a Circular Economy // Nature Environment and Pollution Technology. 2024. Vol. 23. No. 3. Pp. 1239–1259.
9. *Mohamed Sultan A.A., Mativenga P.T.* Sustainable Location Identification Decision Protocol (SuLIDeP) for determining the location of recycling centres in a circular economy // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 223. Pp. 508–521.
10. *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. Pp. 139–144.
11. *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. No. 3. Pp. 65–75. (In Russian)
12. *Iacovidou E., Velis C.A., Purnell P., Zwirner O., Brown A., Hahladakis J., Millward-Hopkins J., Williams P.T.* Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 910–938.
13. *Christensen T.H., Gentil E., Boldrin A., Larsen A.W., Weidema B.P., Hauschild M.* C balance, carbon dioxide emissions and global warming potentials in LCA-modelling of waste management systems // Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy. 2009. Vol. 27. No. 8. Pp. 707–715.
14. *Allegrini E., Vadenbo C., Boldrin A., Astrup T.F.* Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash // Journal of Environmental Management. 2015. Vol. 151. Pp. 132–143.
15. *Hu G., Feng H., He P., Li J., Hewage K., Sadiq R.* Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 251. Pp. 119594.
16. *Puig R., Fullana-i-Palmer P., Baquero G., Riba J.-R., Bala A.* A Cumulative Energy Demand indicator (CED), life cycle based, for industrial waste management decision making // Waste Management. 2013. Vol. 33. No. 12. Pp. 2789–2797.
17. *Fang K., Heijungs R., De Snoo G.R.* Understanding the complementary linkages between environmental footprints and planetary boundaries in a footprint–boundary environmental sustainability assessment framework // Ecological Economics. 2015. Vol. 114. Pp. 218–226.
18. *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: IEEE, 2019. Pp. 429–434.
19. *Derevyanov M.* Analysis of the resource value and resource potential of the objects of the oil-contaminated wastes recycling system based on the DEA method // University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series. 2022. No. 4. Pp. 27–34.
20. *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. Pp. 1207–1212.

21. *Charnes A., Cooper W.W., Lewin A.Y., Seiford L.M.* Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications. Data Envelopment Analysis. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994. 513 p.
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. Pp. 042058.
23. *Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A.* Mnogofaktornyj analiz resurso- i energoberezheniya v sisteme pererabotki tekhnogennyh othodov predpriyatij neftegazovogo kompleksa [Multifactorial analysis of resource and energy conservation in the system of processing technogenic waste of oil and gas enterprises] // Bulletin of Samara State Technical University. Series "Engineering Sciences". 2021. No. 29 (1). Pp. 19–35. (In Russian)
24. *Chen Y., Du J.* Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis // Data Envelopment Analysis: International Series in Operations Research & Management Science. Ed. J. Zhu. Boston, MA: Springer US, 2015. Vol. 221. Pp. 381–414.
25. *Derevyanov M.Yu.* Analiz pokazatelej masshtabirovaniya pri ocenke resursnogo potenciala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchih othodov na osnove metoda DEA [Analysis of scaling indicators in assessing the resource potential of objects of the oil-containing waste processing system based on the DEA method] // Data analysis and processing systems. 2023. No. 3 (91). Pp. 47–68. (In Russian)
26. *Derevyanov M.Yu., 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. Pp. 012023.
27. *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" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Grozny, Russia: Atlantis Press, 2019. Vol. 1. Pp. 33–38.

*Original article submitted 15.08.2024*