

УДК 665.6/.7:502.171

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ПО СИСТЕМНЫМ КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА

М.Ю. Деревянов¹, Ю.Э. Плешивцева², А.А. Афиногентов³, А.Г. Мандра⁴, А.А. Пименов⁵

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

E-mail: mder2007@mail.ru

Аннотация. *Предлагается новый подход к решению задачи многокритериальной оптимизации системы переработки техногенных отходов нефтегазового комплекса. Задача оптимизации формулируется в виде задачи целочисленного математического программирования с ограничениями. Целевая функция в задаче оптимизации формируется с использованием набора оценок эффективности, полученных в результате многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA). Задача решается в условиях принятых ограничений на максимальную длительность процесса переработки размещенных в заданной группе хранилищ отходов с помощью специализированных технологических установок. Для численного решения задачи многокритериальной оптимизации разработано проблемно-ориентированное программное обеспечение.*

Ключевые слова: *техногенные отходы, многокритериальная оптимизация, Data Envelopment Analysis, ресурсосбережение, энергосбережение, экологическая безопасность, нефтегазовый комплекс*

Введение

В последние годы нефтегазовый комплекс (НГК) РФ оказывает наибольшее негативное влияние на экологию по сравнению с другими отраслевыми комплексами из-за загрязнения природной среды техногенными отходами (ТО) [1]. В составе ТО могут присутствовать нефтесодержащие отходы

¹ Деревянов Максим Юрьевич, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», кандидат технических наук, доцент.

² Плешивцева Юлия Эдгаровна, профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», доктор технических наук, профессор.

³ Афиногентов Александр Александрович, доцент кафедры «Трубопроводный транспорт», кандидат технических наук, доцент.

⁴ Мандра Андрей Геннадьевич, доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах», кандидат технических наук, доцент.

⁵ Пименов Андрей Александрович, профессор кафедры «Газопереработка, водородные и специальные технологии», доктор технических наук, профессор.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00353.

разнообразного углеводородного состава, высокомолекулярные смолисто-асфальтеновые вещества, буровые растворы и химические реагенты, широко применяемые при добыче и подготовке нефти, газа и газового конденсата к транспортировке [2]. В результате неправильного обращения с ТО не только загрязняются почва, пластовые и сточные воды, но и образуются соли и шламы. С 2016 по 2020 гг. только в секторе добычи нефти и природного газа НГК образовалось свыше 40 млн т ТО, из которых ежегодно подвергаются обезвреживанию и утилизации в среднем только 24,5 %, а остальные подлежат хранению в специальных хранилищах [3]. Высокие экологические риски, связанные с использованием для складирования углеводородных отходов плохо оборудованных шламовых амбаров, нефтесборников, хранилищ нефтезагрязнений разного состава, приводят к необходимости применения технологий переработки ТО с целью извлечения и повторного использования полезных компонентов. В России доля вторичного использования углеводородов, содержащихся в ТО, не превышает 10 %, тогда как в странах Европы и Северной Америки эта доля достигает 50 % [4–6]. Отсутствие комплексного подхода к организации системы переработки ТО предприятий НГК и низкая эффективность технологических процессов переработки являются основными причинами сложившейся ситуации.

Сложноструктурированный комплекс переработки ТО предприятий НГК представляет собой взаимосвязанную систему хранилищ углеводородных отходов и существующих технологических установок их переработки, расположенных в пределах одного региона России. Объекты комплекса переработки ТО имеют доступ к соответствующей технологической инфраструктуре. Мобильные или стационарные технологические установки обеспечивают переработку ТО, содержащихся в соответствующих хранилищах. Учитывая географическую и функциональную распределенность объектов системы, а также необходимость учета разнородных критериев экологической безопасности, ресурсного потенциала и энергетической эффективности, задачу оптимального управления переработкой ТО следует считать многокритериальной и требующей разработки нестандартных методов и нетривиальных подходов к ее решению.

Использование многокритериального подхода к решению проблем обращения с отходами исследовалось в обзорных статьях [7–10]. Однако эти исследования преимущественно ориентированы на твердые бытовые отходы, которые по объективным причинам уступают нефтесодержащим отходам по потенциалу преобразования их в энергию (англ. Waste-to-Energy). В рассмотренных работах используемые многокритериальные методы принятия решений отличаются небольшой вариативностью, поскольку опираются в основном на экспертные оценки.

Наиболее полный обзор многокритериальных методов принятия решений в области преобразования отходов в энергию включает анализ 153 статей, опубликованных в рецензируемых журналах в период с 1985 по 2020 гг. [11]. В анализируемых работах рассмотрены различные виды отходов (от органических до производственных) и широкий спектр методологий принятия решений (от экспертного метода анализа иерархий [12] до многокритериальных гибридных алгоритмов принятия решений [13]). Однако, по мнению авторов, область переработки ТО предприятий НГК в рассматриваемом обзоре представлена недостаточно полно как в части использования методологии DEA-

метода для принятия решений, так и в части применяемых технологий переработки промышленных отходов. Кроме того, в статье не рассматривается подробно комплексный подход к анализу систем переработки отходов.

Одним из подходов к многокритериальной оптимизации переработки ТО НГК является многофакторный анализ экологической безопасности, технико-экономической эффективности, ресурсо- и энергосбережения в системе переработки, основанный на методе Data Envelopment Analysis (DEA) [14]. Различные методики применения DEA-метода разработаны и подробно описаны авторами в [15–19].

В статье представлен новый подход к многокритериальной оптимизации по системным критериям качества сложноструктурированной системы комплексной переработки ТО предприятий НГК. На первом этапе предлагается решить на основе DEA-метода задачу многофакторного анализа экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения, по результатам которой определяются оценки эффективности системы переработки [18]. Полученные оценки эффективности используются на втором этапе в качестве исходных данных для постановки и решения задачи многокритериальной оптимизации сложноструктурированной системы комплексной переработки ТО стандартными оптимизационными методами. Предлагаемый подход является полностью оригинальным и не имеет известных авторам аналогов.

Анализ экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения системы переработки ТО на основе DEA-метода

В [19] описан общий подход к комплексной оценке эффективности системы переработки отходов на основе DEA-метода, который заключается в последовательном решении задач математического программирования (ЗМП) (табл. 1) с соответствующим формированием целевой функции и ограничений согласно моделям CCR и Super-efficiency метода DEA [20]. В данной работе используются оценки эффективности, полученные в результате решения ЗМП, сформулированной на основе модели Super-efficiency метода DEA:

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

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

В ЗМП (1), (2) $\bar{U} = (\bar{u}_{jz})$, $j = \bar{1}, \bar{J}$, $\bar{V} = (\bar{v}_{iz})$, $i = \bar{1}, \bar{H}$ – векторы весовых коэффициентов для каждого z -го объекта сравнения $z = \bar{1}, \bar{Z}$, которые характеризуют относительный вклад в оценку S_z каждого из выходов y_{jz} , $j = \bar{1}, \bar{J}$, положительно влияющих на оценку F_z , и каждого из входов x_{iz} , $i = \bar{1}, \bar{H}$, отрицательно влияющих на оценку F_z ; \bar{u}_{jk} , $j = \bar{1}, \bar{J}$ и \bar{v}_{ik} , $i = \bar{1}, \bar{H}$ – весовые коэффициенты, полученные в ходе решения ЗМП (1)–(2) для выходных и входных параметров k -го объекта сравнения со значением оценки эффективности $F_k = 1$ (полученным в ходе решения соответствующей ЗМП, сформулированной на основе модели CCR метода DEA [19]); k – порядковый номер объекта

сравнения со значением оценки $F_k = 1$ в анализируемой группе, который исключается из решения ЗМП; $k = \overline{1, P}$, где P – число объектов со значением оценки эффективности $F_k = 1$.

Результатами решения ЗМП (1), (2) являются совокупности относительных оценок $F_z, z = \overline{1, Z}$, $z = \overline{1, N \times M}$. Для анализируемой системы переработки отходов каждый z -й объект сравнения $z = \overline{1, Z}$ представляет комбинацию m -й технологии, $m = \overline{1, M}$ переработки и n -го хранилища ТО, $n = \overline{1, N}$. Оценки объектов сравнения $F_z, z = \overline{1, Z}$ распределены на интервале $(0, \infty)$, и максимальная оценка F_z соответствует наилучшему объекту сравнения относительно целевой функции (1) в анализируемой группе.

Подход к оптимизации системы переработки ТО по системным критериям качества

Целью оптимизации системы переработки отходов ТО является выбор наилучших по величине относительной оценки $F_z, z = \overline{1, Z}$ комбинаций «хранилище ТО – технология переработки» в условиях различных ограничений, в качестве которых могут рассматриваться:

- ограничения на суммарное время работы одной технологической установки;
- ограничение по количеству вредных выбросов в окружающую среду;
- ограничение на расход энергии и др.

На основе оценок эффективности $F_z, z = \overline{1, Z}$ формулируется целевая функция (критерий оптимизации) системы переработки ТО, состоящей из $n = \overline{1, N}$ объектов хранения и $m = \overline{1, M}$ технологических установок для переработки ТО.

Для формирования комплексного критерия оптимизации набор оценок эффективности $F_z, z = \overline{1, Z}$ представляется в виде матрицы размерностью $N \times M$:

$$S = \{S_{nm}\} = \begin{bmatrix} S_{11} & \dots & S_{1m} & \dots & S_{1M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & \dots & S_{nm} & \dots & S_{nM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{N1} & \dots & S_{Nm} & \dots & S_{NM} \end{bmatrix}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}, \quad (3)$$

в которой каждая n -я строка содержит набор оценок эффективности переработки отходов в n -м из N хранилищ с помощью M технологических установок анализируемой группы, а каждый m -й столбец матрицы представляет набор оценок эффективности переработки отходов в каждом из N хранилищ анализируемой группы с помощью m -й из M технологических установок. Алгоритм сопоставления индексов элементов набора оценок F_z индексам элементов матрицы S приведен в табл. 1.

**Алгоритм сопоставления индексов элементов набора оценок F_z
индексам элементов матрицы S**

Номер хранилища $n = \overline{1, N}$	1	...	n	...	N
Номер установки $m = \overline{1, M}$	1 ... m ... M		1 ... m ... M		1 ... m ... M
Номер объекта сравнения $F_z, z = \overline{1, Z}$	1 ... $1 \cdot m$... $1 \cdot M$		$1+(n-1) \cdot M$... $m+(n-1) \cdot M$... $M+(n-1) \cdot M$		$1+(N-1) \cdot M$... $m+(N-1) \cdot M$... $N \cdot M$

В работе [19] представлены постановки ЗМП для оценки эффективности системы переработки отходов, которые используются в соответствующем алгоритме многофакторного анализа комплексной эффективности системы переработки ТО, состоящем из пяти этапов. Решение каждой ЗМП, сформулированной на основе моделей CCR и Super-efficiency метода DEA, осуществляется стандартными оптимизационными методами целочисленного линейного программирования [21], которые реализуются с помощью разработанного авторами специализированного программного обеспечения [22]. Основные параметры, необходимые для формулировки ЗМП в виде (1), (2), приведены в табл. 2 [19].

На основе подхода, описанного в [19], получены численные значения оценок S_{nm}^5 экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности технологий переработки ТО в каждом n -м из N хранилищ ТО с помощью каждой m -й из M технологических установок переработки. Кроме того, рассчитаны длительности переработки в каждом n -м из N хранилищ ТО с помощью каждой m -й из M технологических установок по следующей формуле:

$$t_{nm} = Q_n / q_m + T_m, \quad (4)$$

где Q_n – масса ТО в n -м хранилище, подлежащем переработке, $n = \overline{1, N}$ [тонн]; T_m – минимальное время развертывания (подготовки к использованию) m -й установки по переработке ТО [час]; q_m – производительность m -й установки по переработке ТО, $m = \overline{1, M}$ [т/час].

Параметры ЗМП на основе модели Super-efficiency в соответствии с алгоритмом многофакторного анализа комплексной эффективности системы переработки ТО

<p>Номер ЗМП (этапа): 1 Наименование ЗМП: Оценка оценки ресурсной ценности хранилищ ТО Параметры входа и выхода модели: x_{1n}^1 – средневзвешенное процентное содержание асфальтенов и смол в ТО n-го хранилища [% масс]; x_{2n}^1 – средневзвешенное процентное содержание минеральной части и механических примесей в ТО n-го хранилища [% масс]; x_{3n}^1 – средневзвешенное процентное содержание серы в ТО n-го хранилища [% масс]; x_{4n}^1 – средневзвешенное процентное содержание воды в ТО n-го хранилища [% масс]; y_{1n}^1 – средневзвешенное процентное содержание светлых нефтепродуктов в ТО n-го хранилища ТО [% масс]; y_{2n}^1 – отношение массы светлых нефтепродуктов к массе вредных примесей (асфальтенов и смол, минеральной части и механических примесей, серы, воды). Результат решения ЗМП 1: Оценки S_n^1 ресурсной ценности хранилищ ТО.</p> <p>Номер ЗМП (этапа): 2 Наименование ЗМП: Оценка ресурсного потенциала хранилищ и технологий переработки ТО Параметры входа и выхода модели: x_{1nm}^2 – время утилизации ТО [ч]; x_{2nm}^2 – масса реагентов [т]; x_{3nm}^2 – расход топлива [т]; y_{1nm}^2 – масса полезных продуктов рециклинга [т]; $y_{2nm}^2 = S_n^1$ – оценка ресурсной ценности n-го объекта хранения, полученная в ходе решения ЗМП 1. Результат решения ЗМП 2: Оценки S_{nm}^2 ресурсного потенциала хранилищ и технологий переработки ТО.</p> <p>Номер ЗМП (этапа): 3 Наименование ЗМП: Оценка ресурсо- и энергоэффективности хранилищ и технологий переработки ТО Параметры входа и выхода модели: x_{1nm}^3 – удельные энергетические затраты на доставку отхода или мобильной установки [руб./т]; x_{2nm}^3 – время доставки отходов к месту работы стационарных установок по переработке либо время доставки мобильных установок к месту расположения хранилища ТО [ч]; $y_{1nm}^3 = S_{nm}^2$ – оценки ресурсного потенциала хранилищ и технологий переработки ТО, полученные в ходе решения ЗМП 2. Результат решения ЗМП 3: Оценки S_{nm}^3 ресурсо- и энергоэффективности хранилищ и технологий переработки ТО.</p>
--

Номер ЗМП (этапа): 4

Наименование ЗМП: Оценка экологической безопасности хранилищ и технологий переработки ТО.

Параметры входа и выхода модели:

x_{1nm}^4 – валовый выброс парниковых газов (углекислого газа и метана) [т];

x_{2nm}^4 – валовый выброс сернистого ангидрида [т];

x_{3nm}^4 – валовый выброс в атмосферу сажи [т];

x_{4nm}^4 – масса образовавшейся золы [т];

x_{5nm}^4 – масса образовавшейся загрязненной воды [т];

$y_{1nm}^4 = y_{1nm}^2$ – масса полезных продуктов рециклинга [т], совпадающая с соответствующим выходным параметром ЗМП 2.

Результат решения ЗМП 4: Оценки S_{nm}^4 экологической безопасности хранилищ и технологий переработки ТО.

Номер ЗМП (этапа): 5

Наименование ЗМП: Комплексная оценка экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности хранилищ и технологий переработки ТО.

Параметры входа и выхода модели:

x_{1nm}^5 – удельные энергетические затраты на доставку отхода или мобильной установки [руб./т];

x_{2nm}^5 – время доставки отходов к месту работы стационарных установок по переработке либо время доставки мобильных установок к месту расположения хранилища ТО [ч];

$y_{1nm}^5 = S_{nm}^2$ – оценки ресурсного потенциала хранилищ и технологий переработки ТО [19];

$y_{2nm}^5 = S_{nm}^4$ – оценки экологической безопасности хранилищ и технологий переработки ТО [19].

Результат решения ЗМП 5: Комплексные оценки S_{nm}^5 экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности хранилищ и технологий переработки ТО.

Результаты расчета длительностей переработки могут быть представлены в виде матрицы размерностью $N \times M$, где строки матрицы содержат длительности работы всех M технологических установок для каждого n -го из N хранилищ ТО, а столбцы матрицы содержат длительности работы каждой m -й из M технологических установок для всех N хранилищ ТО:

$$t = \{t_{nm}\} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1m} & \dots & t_{1M} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2m} & \dots & t_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{n1} & t_{n2} & \dots & t_{nm} & \dots & t_{nM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{N1} & t_{N2} & \dots & t_{Nm} & \dots & t_{NM} \end{bmatrix}, \quad n = \overline{1, N}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (5)$$

На основе матрицы (5) далее формулируются наборы ограничений оптимизационной задачи.

Формирование системного критерия качества и формулировка задачи оптимизации

Задача оптимизации системы переработки ТО на достижение максимума выбранной целевой функции (критерия оптимизации) в условиях существующих ограничений может быть сформулирована в виде целочисленной задачи линейного программирования [23].

Требуется найти набор наилучших комбинаций «хранилище – технология переработки ТО» S_{nm} в виде матрицы целых чисел $\Lambda = \{\lambda_{nm}\}$

$$\lambda_{nm} = \{0, 1\}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}, \quad (6)$$

который обеспечивает максимум целевой функции φ , формируемой на множестве значений оценок эффективности S_{nm} , $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$. В (6) $\lambda_{nm} = 1$ означает выбор m -й технологии для переработки ТО в n -м хранилище, в противном случае $\lambda_{nm} = 0$. В качестве целевой функций φ предлагается рассмотреть следующую сумму линейных комбинаций оценок эффективности S_{nm} (из набора табл. 2) и значений параметров λ_{nm} :

$$\varphi = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M S_{nm} \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \max, \quad (7)$$

где $S = \{S_{nm}\}$ – заранее известная матрица (3) оценок эффективности переработки ТО, а матрица целых чисел $\Lambda = \{\lambda_{nm}\}$, определяющая выбор m -й технологической установки для переработки ТО в n -м хранилище, является искомым решением задачи и имеет вид:

$$\Lambda \{\lambda_{nm}\} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1m} & \dots & \lambda_{1M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{n1} & \dots & \lambda_{nm} & \dots & \lambda_{nM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{N1} & \dots & \lambda_{Nm} & \dots & \lambda_{NM} \end{bmatrix}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}. \quad (8)$$

Зададим ограничения задачи математического программирования в виде ограничений на максимальную длительность работы каждой из m технологических установок:

$$\sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot \lambda_{nm} \leq b_m \quad (9)$$

или в виде ограничений на суммарную длительность работы всех m технологических установок:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot \lambda_{nm} \leq B, \quad (10)$$

где $t = \{t_{nm}\}$ – заранее заданная в виде (5) матрица длительностей переработки ТО в каждом n -м из N хранилищ с помощью каждой m -й из M технологических установок.

Поскольку задачу оптимизации целесообразно сформулировать в условиях, когда для одного и того же хранилища может быть определена только одна технологическая установка, необходимо задать дополнительные ограничения:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \lambda_{nm} = N, \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M \lambda_{nm} = 1, n = \overline{1, N}. \quad (12)$$

Ограничение (11) означает, что сумма всех значений искомых параметров λ_{nm} , $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, всегда совпадает с числом N объектов хранения ТО, требующих переработки, т. е. в результате решения задачи оптимизации не только обеспечивается максимум целевой функции, но и гарантируется переработка всех ТО, размещенных во всех N хранилищах анализируемой системы. Ограничение (12) гарантирует, что в результате решения задачи для любого из N хранилищ будет выбрана лишь одна технологическая установка для переработки хранящихся в нем отходов.

В ЗМП на максимум целевой функции (7) при ограничениях (9), (10) и дополнительных условиях (11), (12), решение которой должно быть получено в виде (8), также заранее неизвестными являются значения достигаемых максимальных длительностей работы каждой m -й установки b_m^* , заведомо меньшие или равные соответствующим значениям ограничений b_m

$$\sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot \lambda_{nm} = b_m^* \leq b_m \quad (13)$$

или достигаемой суммарной длительности работы всех m технологических установок:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot \lambda_{nm} = B^* \leq B. \quad (14)$$

Представление решения ЗМП в виде (6) определяет сформулированную задачу математического программирования как задачу целочисленной оптимизации. Задача может быть решена с помощью специальных алгоритмов целочисленной оптимизации с использованием процедур симплекс-метода [24]. Проверка решений может быть проведена с использованием алгоритма последовательного перебора всех возможных комбинаций, однако при больших размерах матрицы решений (8) длительность итерационной процедуры перебора становится неоправданно большой. Для реализации решения задачи указанными способами было разработано специальное программное обеспечение, которое позволяет найти комбинации «хранилище – технология переработки ТО», обеспечивающие максимум целевой функции (7).

Постановки многокритериальной задачи оптимизации системы переработки ТО

Сформулированная в п. 3 задача оптимизации системы переработки ТО обеспечивает достижение экстремума целевой функции, сформированной на основе одной из оценок эффективности системы переработки ТО: ресурсной ценности S_{nm}^1 , ресурсного потенциала S_{nm}^2 , ресурсо- и энергоэффективности

S_{nm}^3 или экологической безопасности переработки S_{nm}^4 (см. табл. 2). В рамках подхода [18] на основе перечисленных частных оценок эффективности системы переработки ТО сформулирован критерий многофакторной оценки экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности хранилищ и технологий переработки ТО и выполнен расчет комплексной оценки S_{nm}^5 с использованием метода DEA; параметры соответствующих ЗМП приведены в табл. 2.

Постановка задачи многокритериальной оптимизации системы переработки ТО в таком случае сводится к задаче линейного программирования (6)–(8) с ограничениями (9)–(12), для которой целевая функция (7) формируется на основе комплексной многофакторной оценки S_{nm}^5 экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности хранилищ и технологий переработки ТО.

Особый интерес представляет получение решения задачи математического программирования, обеспечивающего минимальное время переработки ТО, которое определяется либо как время работы каждой m -й из M технологических установок

$$f_m = \sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \min, m = \overline{1, M}, \quad (15)$$

либо как суммарное время работы всех технологических установок

$$f_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot \lambda_{nm} \rightarrow \min. \quad (16)$$

В таком случае многокритериальная постановка задачи оптимизации системы переработки ТО формулируется как задача достижения максимума целевой функции (7) при минимальном значении критерия (15) или (16).

Пример решения задачи оптимизации системы переработки ТО

В качестве примера задачи оптимизации системы переработки ТО рассмотрим задачу поиска оптимальной комбинации $M = 5$ технологических установок для переработки ТО: МегаМакс (мобильная), Минералоль – Роштофф – Хандель, СОМРЕХ – НТР – 2,2, СОМРЕХ – НТР – 20, УПБШ-10С/УПБШ-10СД (мобильная), размещенных в $N = 16$ объектах хранения.

В качестве оценки эффективности переработки приняты комплексные оценки $S = \{S_{nm}^5\}, n = \overline{1, 16}, m = \overline{1, 5}$ экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности хранилищ и технологий переработки ТО, полученные по алгоритму, приведенному в работе [18] на основе модели Super efficiency DEA метода. В задаче принято ограничение вида (10) на максимальное суммарное время работы всех технологических установок ($B = 13500$ часов) совместно с ограничениями (9) на максимальные длительности работы каждой технологической установки для всех пяти технологических установок ($b_1 = 2700, b_2 = 850, b_3 = 15000, b_4 = 12500, b_5 = 2700$ ч). В качестве целевой функция рассматривается функция (7), максимум которой обеспечивает набор искомых параметров $\Lambda = \{\lambda_{nm}\}$.

Результатом решения поставленной задачи оптимизации системы переработки ТО являются матрица $\Lambda = \{\lambda_{nm}\}$ целых чисел размерностью 16×5 ,

принимающих значения 0 либо 1, значение суммарной длительности работы системы B^* и длительности работы каждой технологической установки b_m^* .

В результате решения задачи оптимизации получено значение критерия эффективности $\varphi = 12.6$, значение суммарной длительности работы системы $B^* = 12365$ ч, длительности работы каждой технологической установки $b_1^* = 2644$ ч, $b_2^* = 109$ ч, $b_3^* = 3143$ ч, $b_4^* = 3944$ ч, $b_5^* = 2525$ ч, матрица $\Lambda = \{\lambda_{nm}\}$ оптимальных комбинаций технологических установок и объектов хранения ТО и соответствующие этим комбинациям значения оценок комплексной эффективности S_{nm}^5 (рис. 1). Суммарная длительность работы установок и длительности работы каждой из пяти технологических установок оказываются меньше заданных ограничений, при этом достигается максимум целевой функции (7).

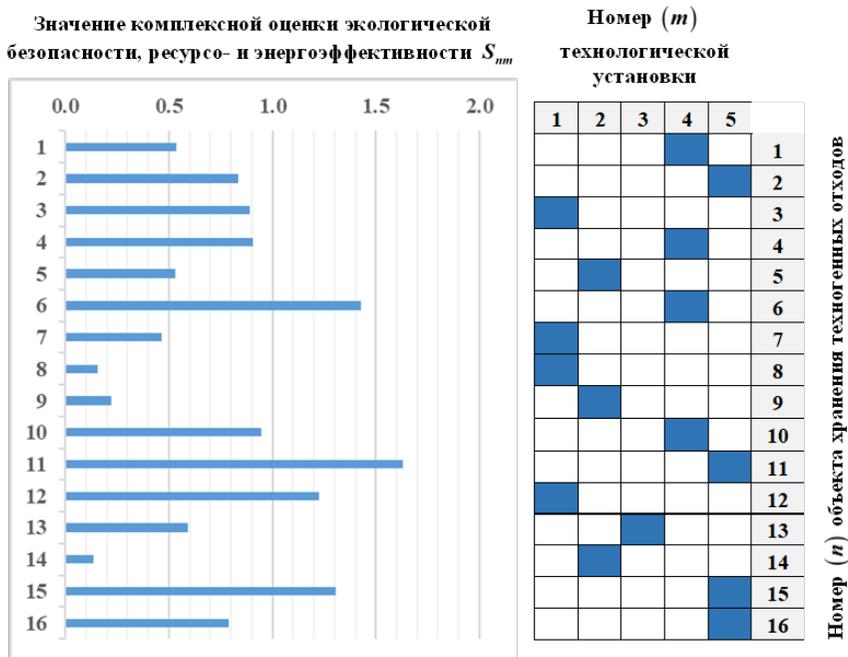


Рис. 1. Значения комплексной оценки экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности S_{nm}^5 для оптимальных комбинаций «хранилище – технология переработки ТО»

На рис. 2 представлено Парето-оптимальное множество решений сформулированной выше задачи многокритериальной оптимизации системы с целью переработки ТО за минимальное суммарное время работы (16) при максимальном значении критерия (7), полученное с помощью разработанного авторами программного обеспечения [22].

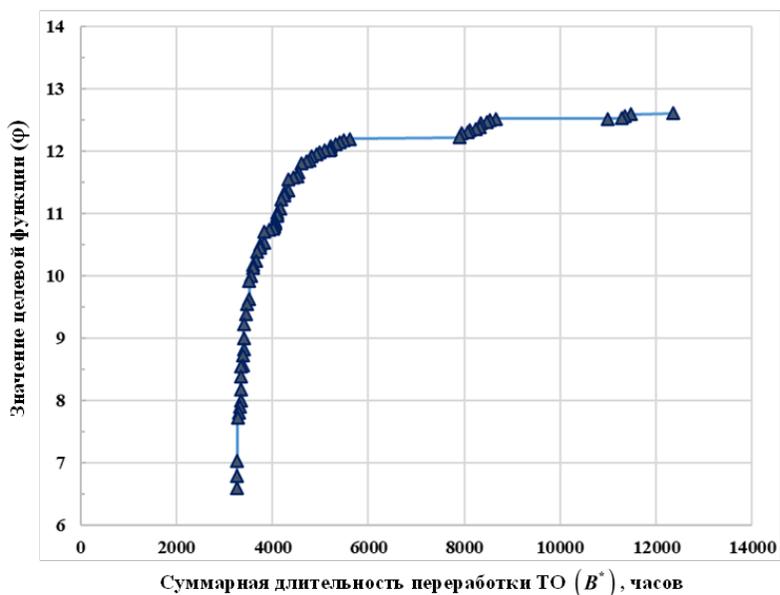


Рис. 2. Зависимость значений целевой функции φ задачи оптимизации системы переработки ТО от суммарной длительности работы системы B^*

Анализ решения показывает, что с уменьшением суммарной длительности работы системы B^* неравномерно снижается максимальная эффективность переработки φ . При этом выбор наилучшей комбинации B^* и φ является отдельной задачей, решение которой определяется в том числе технологическими ограничениями работы системы переработки ТО.

Выводы

В работе решена задача оптимизации системы переработки нефтесодержащих отходов НГК, которая сформулирована как задача целочисленного линейного программирования с ограничениями. В качестве целевой функции используется суммарная оценка, полученная на основе частных показателей эффективности переработки ТО в каждом n -м из N хранилищ с помощью каждой m -й из M технологических установок. Частные оценки ресурсной ценности, ресурсного потенциала, ресурсо- и энергоэффективности и экологической безопасности переработки рассчитываются путем решения задач математического программирования, сформулированных на основе Super Efficiency модели метода DEA. При решении задачи математического программирования рассматриваются ограничения на максимальные длительности работы отдельных технологических установок или ограничение на общее время переработки техногенных отходов, накопленных в хранилищах.

Многокритериальная постановка задачи оптимизации системы переработки ТО формулируется как задача выбора наилучшего по суммарной оценке эффективности варианта переработки накопленных в хранилищах техногенных отходов при минимальном времени работы всей системы либо при минимальном времени работы отдельной технологических установки. Установлена обратная

зависимость общей максимальной эффективности переработки от суммарной длительности работы системы.

Пример решения задачи оптимизации системы переработки ТО, включающей 5 технологических установок для переработки ТО, размещенных в 16 объектах хранения, демонстрирует эффективность разработанного оптимизационного подхода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булатов В.И., Исенбаева Н.О., Нанишвили О.А. Отходы нефтегазового комплекса как технологический индикатор геоэкологического состояния регионов России. Бюллетень науки и практики. 2021. № 7(8). С. 46–55.
2. Крапивский Е.И. Нефтешламы: уничтожение, утилизация, дезактивация. М.; Вологда: Инфра Инженерия, 2021. 432 с.
3. Отходы производства и потребления, окружающая среда: официальная статистика // Федеральная служба государственной статистики РФ. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (14.03.2022).
4. Утилизация отходов – проблемы и пути решения: аналитический обзор. ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы». Министерство образования и науки РФ, 2015. 27 с. URL: https://www.extech.ru/files/anr_2015/anr_5.pdf
5. Ossai I., Ahmed A., Hassan A. et al (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: a review. *Envir Tech & Innov*, № 17. 100526.
6. Farraji H., Zaman N.Q., Mohajeri P. (2016). Waste Disposal: Sustainable Waste Treatments and Facility Siting Concerns. In H. Aziz, & S. Amr (Ed.), *Control and Treatment of Landfill Leachate for Sanitary Waste Disposal*. Pp. 43–74.
7. Soltani A., Hewage K., Reza B., Sadiq R. Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: a review. *Waste Manag*. 2015. № 35. Pp. 318–328.
8. Achilles C., Moussiopoulos N., Karagiannidis A., Baniyas G., Perkoulidis G. The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review. *Waste Manag Res* 2013. № 31(2). Pp. 115–129.
9. Demesouka O.E., Vavatsikos A.P., Anagnostopoulos K.P. GIS-based multicriteria municipal solid waste landfill suitability analysis: a review of the methodologies performed and criteria implemented. *Waste Manag Res* 2014. № 32(4). Pp. 270–296.
10. Coelho Goulart M.L., Lange C.L., Coelho H.M. Multi-criteria decision making to support waste management: a critical review of current practices and methods. *Waste Manag. Res*. 2017. № 35(1). Pp. 3–28.
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*. Vol. 138. 2021. Pp.110563.
12. Olson D.L. (1996). *The Analytic Hierarchy Process*. In: *Decision Aids for Selection Problems*. Springer Series in Operations Research. Springer, New York, NY.
13. Liu H.-C., Wu J., Li P. Assessment of health-care waste disposal methods using a VIKOR-based fuzzy multi-criteria decision making method. *Waste Manag*. 2013. № 33 (12). Pp. 2744–2751.
14. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operation Research*. 1978. № 6 (2). Pp. 429–444.
15. 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. *Proceedings – 2019 21st International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP-2019)*. 2019. Pp. 429–434.
16. 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. № 11. Pp. 139–144.
17. Derevyanov M.Y., 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 *Proceedings – 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021*, 2021. Pp. 817–822.

18. *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 this link is disabled, 2020, № 459(4), 042058.
19. *Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A., Kirpichenkov S.A., Mandra A.G. and 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, Volume 1089, V International Scientific and Technical Conference "Energy Systems" (ICES 2020) 19th – 20th November 2020, Belgorod, Russia. 012023.
20. *Chen Y., Du J.* Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis. In: Zhu J. (eds). Data Envelopment Analysis. International Series in Operations Research & Management Science. 2015. № 221. Springer, Boston, MA.
21. *Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.* Практическая оптимизация. Пер. с англ. М.: Мир, 1985.
22. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Оптимизация сложно-структурированной системы комплексной переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса / Ю.Э. Плишивцева, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра., А.А. Афиногентов, А.А. Пименов (Россия). RU 2021664227; заявл. 24.08.2021; опубл. 01.09.2021.
23. *Шевченко В.Н., Золотых Н.Ю.* Линейное и целочисленное линейное программирование. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2004. 154 с.
24. *George B. Dantzig.* 1990. Origins of the simplex method. A history of scientific computing. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 141–151. <https://doi.org/10.1145/87252.88081>.

Статья поступила в редакцию 08 апреля 2022 г.

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF THE SYSTEM FOR COMPLEX PROCESSING OF OIL CONTAMINATED WASTE REGARDING A SET OF SYSTEM QUALITY CRITERIA

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

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

Abstract. *The paper proposes a new approach to solving the multicriteria optimization problem for the system for processing man-made waste of the oil and gas complex. The optimization problem is formulated as an integer mathematical programming problem with constraints. The objective function in the optimization problem is formed using a set of efficiency assessments obtained as a result of a multivariate analysis of resource and energy savings in the system for processing industrial waste from oil and gas enterprises based on the Data Envelopment Analysis (DEA) method. As restrictions in the problem, constraints on the maximum duration of the process of processing waste placed in a given group of storage facilities with the help of specialized technological installations are considered. Problem-oriented software has been developed for the numerical solution of the problem of multiobjective optimization.*

Keywords: *technogenic waste, multi-criteria optimization, data envelopment analysis, resource saving, energy saving, environmental safety, oil and gas complex*

REFERENCES

1. *Bulatov V., Igenbaeva N., Nanishvili O.* Oil and Gas Complex Waste Products as Technological Indicator of Geocological Condition of Russia Regions. *Bulletin of Science and Practice*, 2021. 7(8), 46–55. (in Russian).
2. *Krapivsky E.* Oil sludge: destruction, recycling, decontamination. Vologda: Infra Engineering, 2021. P. 430 (in Russian).
3. Production and consumption wastes, environment: official statistics // Federal State Statistics Service of the Russian Federation, URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (14.03.2022) (in Russian).
4. Waste management – problems and solutions: an analytical review. Federal State Budgetary Scientific Institution Research Institute – Republican research scientific and consulting center of expertise. https://www.extech.ru/files/anr_2015/anr_5.pdf. Accessed 21 Sept 2021. (in Russian).
5. *Ossai I., Ahmed A., Hassan A. et al.* Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: a review. *Envir Tech & Innov*, 2020. 17. 100526.
6. *Farraji H., Zaman N.Q., Mohajeri P.* Waste Disposal: Sustainable Waste Treatments and Facility Siting Concerns. In H. Aziz, & S. Amr (Ed.), *Control and Treatment of Landfill Leachate for Sanitary Waste Disposal*, 2016. pp. 43–74.
7. *Soltani A., Hewage K., Reza B., Sadiq R.* Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: a review. *Waste Manag*, 2015. 35. 318–28.
8. *Achillas C., Moussiopoulos N., Karagiannidis A., Baniass G., Perkoulidis G.* The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review. *Waste Manag. Res*, 2013. 31(2). 115–29.

* *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.
Andrey A. Pimenov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

9. *Demesouka O.E., Vavatsikos A.P., Anagnostopoulos K.P.* GIS-based multicriteria municipal solid waste landfill suitability analysis: a review of the methodologies performed and criteria implemented. *Waste Manag. Res.*, 2014. 32(4). 270–96.
10. *Coelho Goulart M.L., Lange C.L., Coelho H.M.* Multi-criteria decision making to support waste management: a critical review of current practices and methods. *Waste Manag. Res.*, 2017. 35(1). 3–28.
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*, Volume 138, 2021, 110563.
12. *Olson D.L.* The Analytic Hierarchy Process. In: *Decision Aids for Selection Problems*. Springer Series in Operations Research. Springer, New York, NY, 1996.
13. *Liu H.C., Wu J., Li P.* Assessment of health-care waste disposal methods using a VIKOR-based fuzzy multi-criteria decision making method. *Waste Manag.*, 2013. 33 (12). 2744–51.
14. *Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.* Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operation Research*, 1978. Vol. 6 (2). Pp. 429–444.
15. *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. Proceedings – 2019 21st International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP-2019), 2019. paper № 8976783. Pp. 429–434.
16. *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. Vol. 11. Pp. 139–144.
17. *Derevyanov M.Y., 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 Proceedings – 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021, 2021. Pp. 817–822.
18. *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 this link is disabled, 2020. 459(4). 042058.
19. *Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A., Kirpichenkov S.A., Mandra A.G. and 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, Volume 1089, V International Scientific and Technical Conference "Energy Systems" (ICES 2020) 19th – 20th November 2020, Belgorod, Russia. 012023.
20. *Chen Y., Du J.* Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis. In: *Zhu J. (eds). Data Envelopment Analysis*. International Series in Operations Research & Management Science. 2015. Vol. 221. Springer, Boston, MA.
21. *Gill F., Murray W., Wright M.* Practical optimization. Per. from English. Moscow, Mir, 1985 (in Russian).
22. Certificate No. 2021664227 Russian Federation. Optimization of a complex structured system of complex processing of technogenic waste of oil and gas complex enterprises / Pleshivtseva Yu.E., Derevyanov M.Yu., Mandra A.G., Afinogentov A.A., Pimenov A.A.; applicant and copyright holder of Samara State Technical University. uni. – No. 2021663386 ; application 24.08.2021; registration 01.09.2021. – 1 p. (in Russian).
23. *Shevchenko V.N., Zolotykh N.Yu.* Linear and integer linear programming. Nizhny Novgorod: Publishing House of the Nizhny Novgorod State University. N.I. Lobachevsky, 2004. 154 p. (in Russian).
24. *George B. Dantzig.* 1990. Origins of the simplex method. A history of scientific computing. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 141–151. <https://doi.org/10.1145/87252.88081>.