

УДК 665.6/.7:502.171

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА*

М.Ю. Деревянов, Ю.Э. Плешивецца, А.А. Афиногентов

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

E-mail: mder2007@mail.ru

Аннотация. *Предлагается новый подход к многофакторному анализу ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA). DEA-метод распространяется авторами на совершенно новую предметную область чрезвычайно актуальных инженерных приложений, связанных с проблемами переработки нефти и нефтесодержащих отходов.*

Основой рассматриваемого в статье алгоритма анализа объектов системы переработки ТО является новая методика последовательного решения взаимосвязанных задач многофакторного сравнения объектов по разнородным критериям качества, отличающихся новыми формулировками сопутствующих задач математического программирования.

Разработанный алгоритм многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки позволяет: осуществить сбор, классификацию и обработку информации об объектах системы; оценить и проанализировать ресурсную ценность отходов в хранилищах, которая определяет степень пригодности отходов для использования в качестве материальных ресурсов в технологиях переработки, связанных с их рециклингом, рекуперацией и регенерацией; оценить и проанализировать ресурсный потенциал хранилищ и технологий, определяющий эффективность вторичного использования техногенных отходов с учетом их ресурсной ценности; оценить и проанализировать ресурсо- и энергосбережение в системе.

Полученные в результате решения взаимосвязанных задач математического программирования частные и обобщенные показатели эффективности функционирования системы переработки отходов анализируются в системе поддержки принятия решений и позволяют сформировать локальные управляющие воздействия на систему или обосновать стратегии управления системой переработки отходов.

Предложенный подход может в дальнейшем получить множественные применения в нефтеносных регионах РФ, где рост образования техногенных отходов имеет серьезные и часто необратимые экологические последствия.

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

Деревянов Максим Юрьевич (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Плешивецца Юлия Эдгаровна (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Афиногентов Александр Александрович (к.т.н.), доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».

Ключевые слова: техногенные отходы, Data Envelopment Analysis, ресурсосбережение, энергосбережение, ресурсная ценность, ресурсный потенциал, многофакторный анализ, нефтегазовый комплекс.

Введение

Нефтегазовый комплекс (НГК) занимает ключевую позицию по степени влияния на экономику Российской Федерации. Потери нефти и нефтепродуктов, образующиеся в процессе добычи, транспортировки и переработки углеводородов, по разным оценкам ежегодно достигают от 7 до 10 млн т [1, 2]. При этом в РФ собираются и перерабатываются менее 10 % техногенных отходов (ТО), тогда как в развитых странах Европы доля перерабатываемых ТО составляет около 90 %. В большинстве нефтеносных регионов России (Западная Сибирь, Башкортостан, Татарстан, Самарская и Оренбургская области) главными способами утилизации ТО, к которым относятся нефтесодержащие отходы, буровые шламы, нефтесодержащие воды и почвы и т. п., являются их захоронение или сжигание, а не переработка с целью извлечения полезных продуктов рециклинга для последующего вторичного использования. Поскольку количество ТО удваивается каждые 5–7 лет, стремительно возрастают экологические проблемы, которые принимают критические масштабы и требуют срочного решения [3]. Неэффективное использование полезных ресурсов, содержащихся в ТО, объясняется отсутствием комплексного подхода к организации системы переработки ТО в стране и низкой эффективностью технологических процессов переработки по сравнению с аналогичными технологиями, используемыми в зарубежных странах.

Необходимость анализа эффективности систем переработки ТО обусловлена переходом от концепции управления отходами к концепции управления ресурсами в рамках «экономики замкнутого цикла» [4, 5]. Эффективность обращения с ТО в рамках такой концепции определяется максимальным ресурсосбережением и высокой энергоэффективностью систем переработки ТО на предприятиях НГК. Конечной целью использования ТО в рамках указанной концепции является получение энергии, а одной из основных проблем – научно обоснованное принятие решений по использованию конкретных технологий переработки ТО с учетом заданных критериев эффективности.

Проблема анализа сложно-структурированных систем переработки ТО заключается в необходимости учета множества разнородных факторов, влияющих на конечную оценку эффективности. В качестве таких факторов могут выступать конструктивные характеристики объектов хранения ТО, физические и химические параметры, характеризующие компонентный состав отходов, а также характеристики режимов функционирования технологических процессов переработки, логистические и др. факторы. Указанная проблема решается с помощью методов многофакторного анализа, позволяющих проводить сравнительную оценку технологий с учетом указанных факторов, влияющих на оценку эффективности.

Проблемы принятия решений в области использования отходов как энергетических ресурсов рассматриваются в [6], где приведен обзор 153 статей по многокритериальному анализу стратегий принятия решений относительно применения различных технологий переработки к различным видам отходов, в том числе ТО. В большинстве из представленных исследований описываются технологии сжигания и анаэробного сбраживания ТО с целью получения энергии, что может свидетельствовать о недостаточной оценке ресурсного потенциала ТО и технологий для их переработки и негативном влиянии на окружающую среду из-за вредных выбросов при подобном подходе. В представленном обзоре для анализа возможных

альтернатив при принятии решений используется метод анализа иерархий Т. Сати [7] и аналогичные методы (ELECTRE [8], PROMETHEE [9], TOPSIS [10] и т. д.), которые имеют существенный недостаток, заключающийся в субъективности определения сравнительных оценок и весовых коэффициентов, назначаемых экспертами.

Другой подход к принятию решений в области эффективного управления ресурсами при переработке нефтесодержащих отходов [11] заключается в определении ресурсного потенциала объектов хранения и технологий переработки отходов на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA) [12], который, в отличие от экспертных методов [7–10], свободен от субъективных экспертных мнений и позволяет определить оценки эффективности сравниваемых объектов и весовые коэффициенты решения соответствующей задачи математического программирования (ЗМП) [13]. Ресурсный потенциал ТО предлагается определять в [11] как комплексный количественный показатель возможности эффективного вторичного использования отходов с учетом их ресурсной ценности, оригинальный подход к оценке которой на основе метода DEA представлен в [14]. Ресурсная ценность, представляющая количественную оценку физико-химического состава и свойств ТО, определяет степень пригодности отходов для использования в качестве материальных ресурсов в технологиях переработки нефтесодержащих отходов, связанных с их рециклингом, рекуперацией и регенерацией.

В работе предлагается новый подход к многофакторному анализу ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA). Взаимосвязанная структура объектов хранения, технологий переработки ТО и соответствующей инфраструктуры предприятий НГК рассматривается как единая система переработки отходов.

Общий подход к сравнительному анализу на основе DEA-метода

Предлагаемый в статье алгоритм многофакторного анализа базируется на подходе к сравнительному анализу эффективности группы объектов, представленном в [15] и основанном на формулировке и решении ЗМП, в которых целевая функция и ограничения формируются согласно моделям CCR и Super-efficiency метода DEA [16].

Сравнение Z объектов по некоторому показателю эффективности F_z на основе базовой CCR-модели метода DEA приводит к формулировке задачи поиска максимума целевой функции:

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

при условии принадлежности относительного численного значения оценки F_z интервалу $(0; 1]$, которое записывается в виде ограничения:

$$\frac{\sum_{j=1}^J u_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H v_{iz} x_{iz}} \leq 1, \quad \forall \left(z = \overline{1, Z}; j = \overline{1, J}; i = \overline{1, H}; \right. \\ \left. u_{jz} > 0; v_{iz} > 0 \right), \quad (2)$$

где $u_{jz}, j = \overline{1, J}, z = \overline{1, Z}$ и $v_{iz}, i = \overline{1, H}, z = \overline{1, Z}$ – весовые коэффициенты, которые характеризуют относительный вклад в оценку F_z каждого из выходов $y_{jz}, j = \overline{1, J}$, положительно влияющих на оценку F_z , и каждого из входов $x_{iz}, i = \overline{1, H}$, отрицательно влияющих на оценку F_z , соответственно. Размерность векторов входных и выходных параметров определяется числом учитываемых в сравнительном анализе факторов и потенциальной возможностью определения их численных значений для всех объектов сравнения.

Решение сформулированной ЗМП (1) в условиях ограничений (2) стандартными оптимизационными методами [13] позволяет определить относительные значения оценок $F_z, z = \overline{1, Z}$ для каждого из Z объектов анализируемой группы, а также весовые коэффициенты $u_{jz} \in G, j = \overline{1, J}, z = \overline{1, Z}$ и $v_{iz} \in G, i = \overline{1, H}, z = \overline{1, Z}$, доставляющие максимум соответствующему функционалу (1).

Результатом решения Z ЗМП является совокупность оценок $F_z, z = \overline{1, Z}$; при этом несколько из Z объектов в анализируемой системе могут одновременно получить максимально возможную оценку $F_z = 1$, что не позволяет выявить наилучшие объекты в группе. Объекты с оценками $0 < F_z < 1$ считаются тем менее эффективными относительно рассматриваемого показателя, чем ближе относительное значение оценки F_z к нулю.

Связанная с результатами решения ЗМП (1)–(2) модель Super-efficiency DEA-метода применяется в тех случаях, когда необходимо определить наилучший объект в анализируемой группе при наличии нескольких объектов со значениями оценок эффективности, равными 1 [16]. Аналогично (1)–(2), ЗМП на основе модели Super-efficiency DEA-метода может быть представлена в виде:

$$S_z(X_z, Y_z) = \frac{\sum_{j=1}^J \bar{u}_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H \bar{v}_{iz} x_{iz}} \rightarrow \max_{\bar{U}, \bar{V} \in \bar{G}}, \quad (3)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^J \bar{u}_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H \bar{v}_{iz} x_{iz}} \leq 1 \quad \forall \left(\begin{array}{l} z = \overline{1, Z}; z \neq k; j = \overline{1, J}; \\ i = \overline{1, H}; \bar{u}_{jz} > 0; \bar{v}_{iz} > 0 \end{array} \right), \quad (4)$$

где $\bar{U} = (\bar{u}_{jz}), j = \overline{1, J}; \bar{V} = (\bar{v}_{iz}), i = \overline{1, H}$ – векторы весовых коэффициентов для каждого z -го объекта сравнения, $z = \overline{1, Z}$, которые за исключением весовых коэффициентов \bar{u}_{jk} и \bar{v}_{ik} являются неизвестными; $\bar{u}_{jk}, j = \overline{1, J}$ и $\bar{v}_{ik}, i = \overline{1, H}$ – весовые коэффициенты, полученные для выходных и входных параметров k -го объекта сравнения со значением оценки эффективности $F_k = 1$, соответственно, рассчитанной на основе решения ЗМП в форме (1)–(2); k – порядковый номер объекта сравнения со значением оценки $F_k = 1$ в анализируемой группе, которые исключаются из решения ЗМП в форме (3)–(4); $k = \overline{1, P}$, где P – число объектов со значением оценки эффективности $F_k = 1$.

Получаемые в результате решения ЗМП (3)–(4) сравнительные оценки S_z , $z = \overline{1, Z}$ распределены на интервале $(0, \infty)$. Максимальная оценка S_z соответствует наилучшему объекту сравнения относительно целевой функции (3) в анализируемой группе.

Алгоритм многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО

Описанный выше подход, основанный на DEA-методе, получил свою дальнейшую разработку и был распространен авторами на совершенно новую предметную область чрезвычайно актуальных инженерных приложений, связанных с проблемами переработки нефти и нефтесодержащих отходов [11, 14, 15].

Основой рассматриваемого в статье алгоритма анализа объектов системы переработки ТО является разработанная авторами методика последовательного решения взаимосвязанных задач многофакторного сравнения объектов по разнородным критериям качества, отличающихся новыми формулировками сопутствующих задач математического программирования. В качестве объектов сравнения рассматриваются хранилища ТО и технологии их переработки.

Представленный на рис. 1 алгоритм базируется на последовательном решении трех взаимосвязанных задач сравнительного анализа объектов системы переработки отходов, позволяющих ранжировать данные объекты по их ресурсной ценности, ресурсному потенциалу, а также по критериям ресурсосбережения и энергетической эффективности.



Рис. 1. Алгоритм многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО

Представленный на рис. 1 алгоритм включает 6 этапов.

Сбор и обработка информации проводятся на первом этапе на основе разработанных принципов классификации, систематизации и анализа информации, которые позволяют не только обеспечить систематизированный сбор информации о хранилищах и технологиях переработки отходов, но и оценить ее качество (полноту, точность, достоверность, актуальность, согласованность). В процессе классификации и систематизации информации определяются основные характеристики объектов системы переработки ТО, являющиеся исходными данными для решения ЗМП 1–3 (см. рис. 1).

На втором этапе решается задача анализа ресурсной ценности [11] отходов в N хранилищах системы (ЗМП 1), сформулированная в виде (1)–(2) на основе CCR-модели и в виде (3)–(4) на основе модели Super-efficiency DEA-метода. Основными выходными параметрами, характеризующими ресурсную ценность ТО в хранилищах, являются средневзвешенное содержание светлых углеводородов и отношение массы светлых углеводородов к суммарной массе вредных примесей и воды (выходы 5–6, см. рис. 1). Входными параметрами, уменьшающими ресурсную ценность ТО в хранилищах, являются удельные содержания воды, асфальтенов и смол, механических и минеральных примесей, серы (входы 1–4 на рис. 1). Результатом решения ЗМП 1 в виде (1)–(2) и (3)–(4) являются относительные оценки F_n^1 и S_n^1 , $n = \overline{1, N}$ ресурсной ценности ТО соответственно. 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 для использования в качестве материальных ресурсов для дальнейшей переработки.

На третьем этапе определяется ресурсный потенциал для двух видов объектов анализируемой системы переработки ТО: хранилищ и технологий переработки ТО [11].

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

Задача анализа ресурсного потенциала системы переработки ТО (ЗМП 2) также формулируется в виде (1)–(2) и (3)–(4) на основе моделей CCR и Super-efficiency DEA-метода соответственно. Входными параметрами ЗМП 2 являются длительность переработки ТО, масса реагентов и расход энергии (топлива) (входы 7–9 и 10–12 на рис. 1). Выходными параметрами ЗМП 2 являются масса полезных продуктов рециклинга (выходы 13 и 14, см. рис. 1) и оценка S_n^1 , $n = \overline{1, N}$ ресурсной ценности хранилища ТО, полученная на основе решения ЗМП 1 в виде (3)–(4).

Решение ЗМП 2 позволяет определить относительные оценки F_{nm}^2 и S_{nm}^2 , $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$ ресурсного потенциала n -го хранилища при переработке находящихся в нем отходов с помощью m -ой технологии. Анализ оценок S_{nm}^2 , $n = \overline{1, N}$ по модели Super-efficiency DEA-метода позволяет выявить, какое из N хранилищ в анализируемой системе обладает наибольшим ресурсным потенциалом относительно каждой m -ой из M технологий переработки в анализируемой системе. Аналогично в результате решения ЗМП 2 определяются относительные оценки F_{nm}^2 и S_{nm}^2 , $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$ ресурсного потенциала m -ой технологии для переработки

ТО в n -ом хранилище. Анализ оценок $S_{mn}^2, m = \overline{1, M}$ ресурсного потенциала позволяет выявить наилучшую m -ую технологию для переработки отходов в каждом n -ом из N анализируемых хранилищ в рассматриваемой системе переработки ТО.

На четвертом этапе решается комплексная задача многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО (ЗМП 3 на рис. 1). Ресурсосбережение в системе переработки ТО заключается в эффективном и экономном использовании ресурсов при переработке с учетом ресурсного потенциала отходов и технологий их переработки. При фиксированном расходе энергии непосредственно в процессе переработки, зависящем от технологических особенностей этого процесса, цель энергосбережения достигается путем минимизации энергетических затрат на транспортировку отходов, мобильных технологических установок, реагентов и продуктов переработки с учетом длительности и стоимости транспортировки.

ЗМП 3, так же, как и ЗМП 2, решается для двух типов объектов анализируемой системы переработки ТО: хранилищ и технологий переработки ТО. Входными параметрами ЗМП 3 являются: удельные энергетические затраты на транспортировку (входы 15 и 17 на рис. 1), включающие затраты на транспортировку ТО от хранилищ к местам расположения стационарных установок переработки или затраты на транспортировку мобильных установок переработки к хранилищам ТО; затраты на транспортировку реагентов к хранилищу ТО с учетом характеристик вида транспорта и стоимости проезда по дорогам федерального значения (система «ПЛАТОН» [17]); длительности доставки (входы 16 и 18 на рис. 1) с учетом времени на транспортировку и длительности погрузочно-разгрузочных операций. Выходными параметрами являются оценки S_{mn}^2 и $S_{mn}^2, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}$ ресурсного потенциала, полученные в результате решения ЗМП 2.

В результате решения ЗМП 3, сформулированных в виде (1)–(2) и (3)–(4) на основе ССР-модели и модели Super-efficiency DEA-метода соответственно, определяются относительные комплексные многофакторные оценки F_{mn}^3 и $S_{mn}^3, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}$ ресурсо- и энергосбережения при переработке отходов в анализируемых хранилищах системы. Анализ комплексных оценок $S_{mn}^3, n = \overline{1, N}$ позволяет выявить наилучшее n -ое хранилище, переработка ТО в котором с помощью каждой m -ой из анализируемой группы M технологий осуществляется с наибольшим ресурсо- и энергосбережением в системе.

Аналогично в результате решения ЗМП 3 определяются относительные комплексные многофакторные оценки F_{mn}^3 и $S_{mn}^3, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}$ ресурсо- и энергосбережения при использовании m -ой технологии для переработки ТО в каждом n -ом хранилище. Анализ комплексных оценок $S_{mn}^3, m = \overline{1, M}$ позволяет выявить наилучшую m -ую технологию для переработки ТО в каждом n -ом из N хранилищ с наибольшим ресурсо- и энергосбережением в системе переработки в целом.

На пятом этапе алгоритма происходит обработка полученных результатов многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО и передача информации в систему поддержки принятия решений (шестой этап).

Предполагается, что в системе поддержки принятия решений будут анализироваться два типа оценок эффективности: частные и обобщенные.

Частные оценки используются для локальной оптимизации системы переработки ТО, когда с помощью разработанного алгоритма выбирается оптимальная

пара «хранилище – технология переработки» по соответствующим критериям эффективности в отношении анализируемых групп хранилищ или технологий переработки ТО. Таким образом, частные оценки соответствуют максимальным оценкам $S_n^1, S_{nm}^2, S_{mn}^2, S_{nm}^3, S_{mn}^3, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}$, полученным путем решения ЗМП 1–3 (см. рис. 1) соответственно, и позволяют принимать локальные управленческие решения:

– по выбору из N объектов хранения в системе для вторичной переработки такого хранилища, отходы в котором обладают наибольшей ресурсной ценностью, согласно соответствующей оценке:

$$I_{\max}^1 = \max(S_n^1), n = \overline{1, N}; \quad (5)$$

– по выбору из N объектов хранения в системе для вторичной переработки такого хранилища, отходы в котором обладают максимальным ресурсным потенциалом при применении m -ой технологии, согласно соответствующей оценке:

$$IN_m^2 = \max(S_{nm}^2), n = \overline{1, N}; \quad (6)$$

– по выбору из M технологий, применяемых в системе для вторичной переработки отходов в n -ом хранилище, такой технологии, которая имеет максимальный ресурсный потенциал согласно соответствующей оценке:

$$IM_n^2 = \max(S_{mn}^2), m = \overline{1, M}; \quad (7)$$

– по выбору такой пары «хранилище – технология переработки», которая обеспечивает наиболее эффективное использование ресурсного потенциала системы согласно соответствующей оценке:

$$I_{\max}^2 = \max(S_{nm}^2) = \max(S_{mn}^2), n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}; \quad (8)$$

– по выбору из N объектов хранения в системе для вторичной переработки такого хранилища, в котором переработка отходов осуществляется с максимальным ресурсо- и энергосбережением, согласно соответствующей комплексной оценке:

$$IN_m^3 = \max(S_{nm}^3), n = \overline{1, N}; \quad (9)$$

– по выбору из M технологий, применяемых в системе для вторичной переработки отходов в n -ом хранилище, такой технологии, которая обеспечивает наиболее энергоэффективную и наименее ресурсозатратную переработку ТО согласно соответствующей комплексной оценке:

$$IM_n^3 = \max(S_{mn}^3), m = \overline{1, M}; \quad (10)$$

– по выбору такой пары «хранилище – технология переработки», которая обеспечивает наиболее энергоэффективную и наименее ресурсозатратную переработку ТО согласно соответствующей оценке:

$$I_{\max}^3 = \max(S_{nm}^3) = \max(S_{mn}^3), n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}. \quad (11)$$

Обобщенные оценки используются в случаях принятия стратегических решений по управлению в системе переработки отходов, когда определяются либо

наилучшие технологии для всей группы из N хранилищ, либо наилучшие для переработки хранилища ТО относительно всей группы из M технологий в составе системы.

В качестве обобщенных оценок при проведении анализа результатов решения ЗМП 2–3 (см. рис. 1), предлагается использовать:

– комплексную оценку SN_m^2 ресурсного потенциала m -ой технологии при ее применении для переработки ТО в N хранилищах анализируемой системы, определяемую в виде:

$$SN_m^2 = \sum_{n=1}^N S_{mn}^2, m = \overline{1, M}; \quad (12)$$

– комплексную оценку SN_m^3 относительной эффективности использования ресурсов и энергии при применении m -ой технологии для переработки ТО в N хранилищах системы:

$$SN_m^3 = \sum_{n=1}^N S_{mn}^3, m = \overline{1, M}. \quad (13)$$

Применение разработанного алгоритма и анализ результатов

Для апробации разработанного алгоритма был проведен многофакторный анализ системы переработки ТО, 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.

Анализ ресурсной ценности ТО. На рис. 2 представлены ранжированные оценки S_n^1 , $n = \overline{1, 90}$ ресурсной ценности ТО в хранилищах системы, полученные в результате решения ЗМП 1, сформулированной в виде (3)–(4) на основе модели Super-efficiency DEA-метода. На рис. 2 показаны 10 хранилищ, получивших максимальные оценки ресурсной ценности хранящихся в них отходов, и 10 хранилищ, имеющих минимальные значения данных оценок.

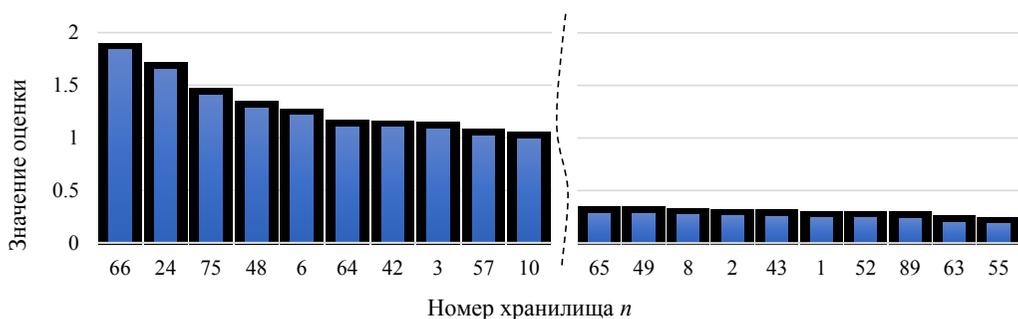


Рис. 2. Оценки S_n^1 ресурсной ценности ТО

Характеристики технологий переработки ТО

<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 ³ /ч	Нефть
2	Минералоль	Пиролиз с рекуперацией	2 м ³ /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 ³ /ч	Нефть
6	Electric-Scru 10	Термический метод/рекуперация	0,1–20 м ³ /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 ³ /ч	Жидкое печное топливо, технический углерод, газ
10	ПУ-01	Технология обезвреживания нефтесодержащих отходов методом реагентного капсулирования	2 м ³ /ч	Зола, горячая вода, пар, электроэнергия
11	УПБШ-10С/УПБШ-10СД	Физико-химический метод/рекуперация	10–15 м ³ /ч	Грунтово-шламовая смесь для отсыпки дорог 3-й категории
12	УОГ-15-В2ГЦ2-10	Физико-химический метод/рекуперация	15–20 м ³ /ч	Нефть
13	Есо-TechRecOil Оу	Физико-химический метод	30–50 м ³ /ч	Товарный нефтепродукт
14	ИнноТек	Физико-химический метод/рекуперация	0,3–0,35 т/ч	Жидкое печное топливо, зола

Анализ представленных на рис. 2 результатов показывает, что максимальной ресурсной ценностью в рассматриваемой системе переработки обладают отходы в шламонакопителе (хранилище № 66) с оценкой $I_{\max}^1 = S_{66}^1 = 1.84$. Очевидно, что для наиболее рационального использования отходов, имеющих наибольшую ре-

сурсную ценность, в первую очередь имеет смысл перерабатывать ТО в хранилищах $n = 66, 24, 75, 48, 6, 64, 42, 3, 57$, имеющих оценки ресурсной ценности $S_n^1 \geq 1$ (см. рис. 2). ТО в хранилищах $n = 65, 49, 8, 2, 43, 1, 52, 89, 63, 55$, имеющих минимальные оценки ресурсной ценности $S_n^1 < 0.3$, нецелесообразно перерабатывать (см. рис. 2).

Анализ ресурсного потенциала системы переработки ТО

На рис. 3 и 4 представлены результаты решения ЗМП 2, сформулированной в виде (3)–(4) на основе модели Super-efficiency DEA-метода. На рис. 3 показаны ранжированные оценки $S_{n13}^2, n = \overline{1,90}$ и $S_{m90}^2, m = \overline{1,14}$ ресурсного потенциала хранилищ системы при применении технологии № 13 для переработки отходов в них; представлены 10 хранилищ с максимальными и 10 с минимальными оценками. На рис. 4 представлены оценки ресурсного потенциала технологий с учетом переработки ТО в хранилище № 90.

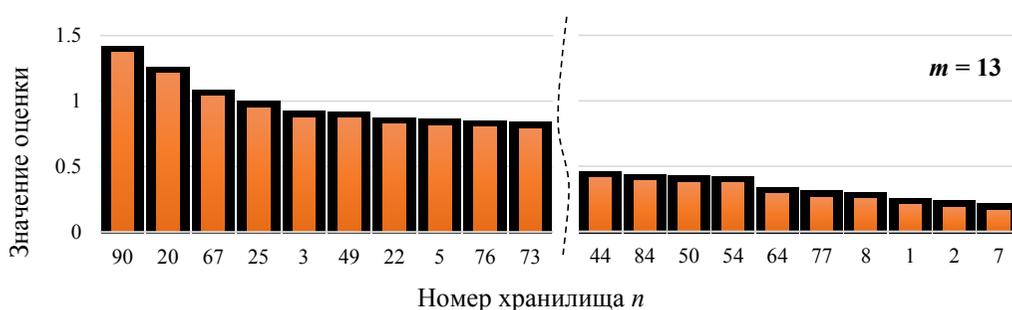


Рис. 3. Оценки S_{n13}^2 ресурсного потенциала хранилищ при применении технологии № 13 для переработки ТО

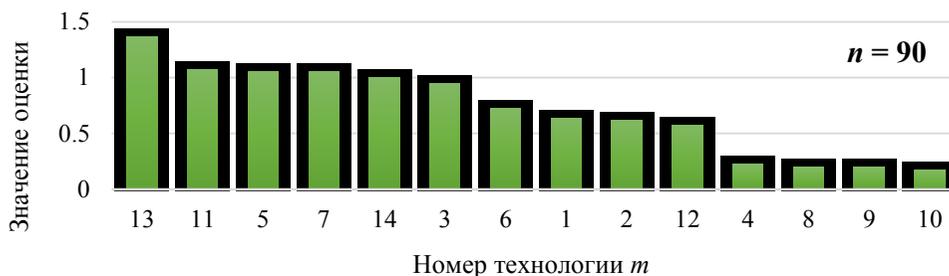


Рис. 4. Оценки S_{m90}^2 ресурсного потенциала технологий при их применении для переработки ТО в хранилище № 90

Анализ представленных на рис. 3 и 4 результатов показывает, что наилучшей по ресурсному потенциалу в системе переработки ТО является пара «обвалование свечи аварийного сброса (хранилище № 90) – технология Eco-TechRecOil Oy (технология № 13)» с оценкой $I_{\max}^2 = S_{90\ 13}^2 = S_{13\ 90}^2 = 1.37$, определяемой согласно (8).

На рис. 5 представлены ранжированные результаты анализа по выбору в системе наилучших по ресурсному потенциалу хранилищ в виде оценок IM_n^2 (на рис. 5а показаны 10 хранилищ с максимальными и 10 с минимальными оценками), определяемых согласно (7), и технологий переработки ТО в виде ранжированных оценок IN_m^2 (рис. 5б), определяемых согласно (6).

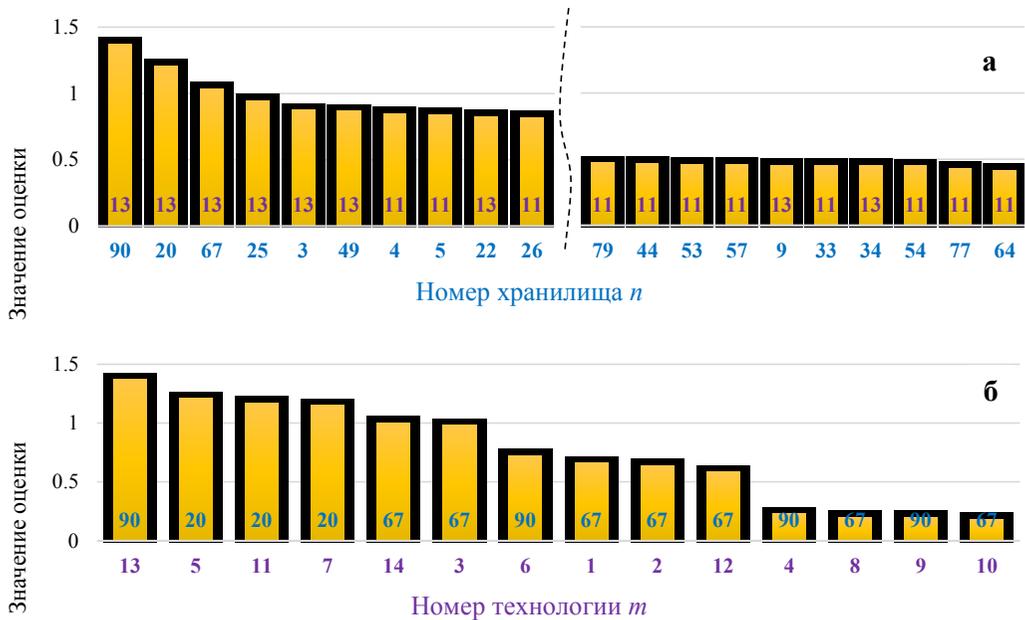


Рис. 5. Наилучшие относительные оценки ресурсного потенциала (решение ЗМП 2):
 а – для хранилищ (IM_n^2); б – для технологий (IN_m^2)

Каждая из представленных на рис. 5 оценок IM_n^2 и IN_m^2 является максимальной в своей группе. Это означает, что наилучшей для переработки ТО в хранилище № 90 является технология № 13 с оценкой $IM_{90}^2 = IN_{13}^2 = 1.37$. В свою очередь, при применении технологии Holo-Scru 10 (№ 5) наилучшим по ресурсному потенциалу для переработки является ТО в илонакопителе (хранилище № 20) с оценкой $IN_5^2 = 1.209$ (рис. 5б). При этом для переработки отходов в хранилище № 20 наилучшей по ресурсному потенциалу является технология Eco-TechRecOil Oy (№ 13) с оценкой $IM_{20}^2 = 1.21$ (рис. 5а).

На рис. 6 представлены результаты анализа ресурсного потенциала системы переработки хранилищ ТО в виде ранжированных комплексных оценок SN_m^2 , полученных по формуле (12).

Наилучшей по ресурсному потенциалу для всех хранилищ в составе системы является технология Eco-TechRecOil Oy (№ 13) с максимальной суммарной оценкой $SN_{13}^2 = 53.5$ (рис. 6). Очевидно, что для наиболее эффективного использования ресурсного потенциала хранилищ в системе переработки ТО необходимо применять технологии $m = 13, 11, 5, 7, 14$ для их переработки.



Рис. 6. Комплексные оценки SN_m^2 ресурсного потенциала технологий в системе переработки ТО

Анализ ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО. Аналогично рассмотренной выше процедуре анализа ресурсного потенциала (см. рис. 3–6) проводится анализ ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО путем решения соответствующих ЗМП 3, сформулированной в виде (3)–(4) на основе модели Super-efficiency DEA-метода, в результате чего определяются оценки эффективности для каждой группы объектов системы переработки ТО. На рис. 7 представлены результаты анализа ресурсосбережения и энергетической эффективности системы переработки хранилищ ТО в виде ранжированных комплексных оценок SN_m^3 , полученных по формуле (13).



Рис. 7. Комплексные оценки SN_m^3 относительной эффективности использования ресурсов и энергии технологиями в системе переработки ТО

Технология УПБШ-10С/УПБШ-10СД (№ 11) обеспечивает наиболее энергоэффективную и наименее ресурсозатратную переработку ТО во всех хранилищах системы с максимальной суммарной оценкой $SN_{11}^3 = 16.77$ (рис. 7). Использование технологий $m = 3, 1, 4, 2, 8, 14, 9, 7, 5, 6, 10$ для переработки ТО в системе является практически нецелесообразным из-за низкого уровня оценок ресурсосбережения и энергетической эффективности. Изменение актуальных значений оценок системы возможно при изменении мест географического расположения установок переработки или их замене на мобильные аналоги, однако в этом случае потребуются учесть дополнительные затраты и оценить экономическую эффективность планируемых преобразований.

Выводы

В работе предложен новый подход к многофакторному анализу ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса на основе метода DEA. Подробно описаны этапы разработанного алгоритма многофакторного анализа системы переработки техногенных отходов.

Полученные результаты подтверждают возможность использования предлагаемого подхода на основе метода DEA и позволяют выбрать наилучшее решение по управлению объектами в рассматриваемой системе переработки ТО, учитывая ресурсную ценность ТО, ресурсный потенциал, ресурсо- и энергосбережение процессов переработки отходов в системе.

Известный DEA-метод анализа данных, приобретающий широкое распространение в мировой практике использования математического аппарата производственных функций для решения задач оценивания эффективности технических систем, распространен на задачи оптимизации систем переработки техногенных отходов, что можно рассматривать как теоретическую основу создания не имеющих аналогов подходов к многокритериальной оптимизации производственных систем.

Предложенный подход и разработанный алгоритм могут в дальнейшем получить множественные применения в нефтеносных регионах, где рост образования техногенных отходов имеет серьезные и часто необратимые экологические последствия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазлова Е.А., Мецержков С.В. Проблемы утилизации нефтешламов и способы их переработки. – М: Ноосфера. 2001. – С. 54.
2. Гарабаджиу А.В. Кластер технологических установок переработки многотоннажных накопленных кислых гудронов и нефтешламов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2012. – Вып. 9. – С. 37–48.
3. Косулина Т.П., Кононенко Е.А. Повышение экологической безопасности продукта утилизации нефтяных шламов // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 78. – С. 84–93.
4. Ashby M.F. Chapter 14-the vision: a circular materials economy. In: Ashby, M.F. (Ed.), *Materials and Sustainable Development*. Butterworth-Heinemann, Boston. 2016. Pp. 211–239.
5. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *J. Clean. Prod.* 2016. Vol. 114. Pp. 11–32.
6. 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*. 2020. paper № 110563. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110563>.
7. Saati T. *Decision-making. Analytic hierarchy process*. М.: Radio and communication, 1993. 278 p.
8. Morrissey A.J., Browne J. Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste Management*. 2004. Vol. 24. Pp. 297–308.
9. Brans J.P., Mareschal B. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. In: Figueira J, Greco S and Ehrgott M (eds). 2005. New York, USA: Springer Science + Business Media, Inc. Pp. 163–196.
10. Hwang C.L., Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making-Methods and Applications: A State of the Art Survey*. 1981. Berlin; New York: Springer-Verlag.
11. 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.

12. 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.
13. Michael J. Todd. The many facets of linear programming. *Mathematical Programming*. 2002. Vol. 91 (3). Pp. 417–436.
14. 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. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*. 2018. Vol. 11. Pp. 139–144.
15. Деревянов М.Ю., Плишивцева Ю.Э., Афиногентов А.А., Мандра А.Г., Пименов А.А. Многокритериальная оценка сложно-структурированной системы комплексной переработки техногенных отходов нефтеперерабатывающей промышленности // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. – 2020. – Т. 4. – С. 37–44.
16. 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.
17. Постановление Правительства РФ от 14 июня 2013 г. № 504 «О взимании платы в счет возмещения вреда, причиняемого автомобильным дорогам общего пользования федерального значения транспортными средствами, имеющими разрешенную максимальную массу свыше 12 тонн».

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2020 г.

MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF RESOURCE SAVING AND ENERGY EFFICIENCY IN THE TECHNOGENIC WASTE PROCESSING SYSTEM OF THE OIL AND GAS INDUSTRY

M.Yu. Derevyanov, Yu.E. Pleshivtseva, A.A. Afinogentov¹

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

Abstract. *The paper proposes a new approach to multi-criteria analysis of resource and energy saving in the system of processing industrial waste of oil and gas enterprises based on the Data Envelopment Analysis (DEA) method. The DEA method is being extended by the authors to a completely new subject area of extremely important engineering applications related to the problems of processing oil and oily waste.*

The basis of the algorithm for analyzing objects of the wastes processing system considered in the article is a new methodology for sequentially solving interrelated problems of multi-factorial comparison of objects according to heterogeneous quality criteria, which differ in new formulations of related problems of mathematical programming.

The developed algorithm for multi-criteria analysis of resource and energy saving in the processing system allows: collecting, classifying and processing information about the objects of the system; assessment and analysis of the resource value of waste in storage, which determines the degree of suitability of waste for use as material resources in processing technologies associated with their recycling and recovery; assessment and analysis of the resource potential of storage facilities and technologies, which determines the efficiency of

*Maksim Yu. Derevyanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Yuliya E. Pleshivtseva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksandr A. Afinogentov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

the secondary use of industrial waste, taking into account their resource value; evaluation and analysis of the resource and energy saving in the system in general.

The partial and generalized indicators of the efficiency of the waste processing system obtained as a result of solving interrelated problems of mathematical programming are analyzed in the decision support system and make it possible to form local control actions on the system or to justify the strategies for managing the waste processing system.

The proposed approach can in the future receive multiple applications in the oil-bearing regions of the Russian Federation, where the growth in the formation of the technogenic waste has serious and often irreversible environmental consequences.

Keywords: *technogenic waste, data envelopment analysis, resource saving, energy saving, resource value, resource potential, multivariate analysis, oil and gas complex.*

REFERENCES

1. *Mazlova E.A., Mesheryakov S.V.* Problemy utilizatsii nefteshlamov i sposoby ih pererabotki. Moscow, Noosfera. 2001. P. 54. (In Russian).
2. *Garabadzhiu A.B.* Klaster tehnologicheskikh ustanovok pererabotki mnogoton-nazhnykh nakopleniy kislykh gudronov i nefteshlamov. Neftepererabotka I neftehimiya. Nauchno-tehnicheskie dostozheniya I peredovoj opyt. 2012. Vol. 9. Pp. 37–48. (In Russian).
3. *Kosulina T.P., Kononenko E.A.* Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti utilizatsii neftyanykh shlamov. Nauchnyj zhurnal KubGAU. 2012. Vol. 78. Pp. 84–93. (In Russian).
4. *Ashby M.F.* Chapter 14—the vision: a circular materials economy. In: Ashby, M.F. (Ed.), *Materials and Sustainable Development*. Butterworth-Heinemann, Boston. 2016. Pp. 211–239.
5. *Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S.* A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *J. Clean. Prod.* 2016. Vol. 114. Pp. 11–32.
6. *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*. 2020. paper № 110563. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110563>
7. *Saati T.* Decision-making. Analytic hierarchy process. M.: Radio and communication. 1993. 278 p.
8. *Morrissey A.J., Browne J.* Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste Management*. 2004. Vol. 24. Pp. 297–308.
9. *Brans J.P., Mareschal B.* Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. In: Figueira J, Greco S and Ehrgott M (eds). 2005. New York, USA: Springer Science + Business Media, Inc. Pp. 163–196.
10. *Hwang C.L., Yoon K.* Multiple Attribute Decision Making-Methods and Applications: A State of the Art Survey. 1981. Berlin; New York: Springer-Verlag.
11. *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.
12. *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.
13. *Michael J. Todd.* The many facets of linear programming. *Mathematical Programming*. 2002. Vol. 91 (3). Pp. 417–436.
14. *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.
15. *Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A., Mandra A.G., Pimenov A.A.* Mnogokriterial'naya ocenka slozhno-strukturirovannoj sistemy kompleksnoj pererabotki tekhnogennykh otdohodov neftepererabatyvayushchej promyshlennosti. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah: sb. tr. mezhdunar. nauch. konf.* 2020. Vol. 4. Pp. 37–44.

16. *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.
17. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 14 June 2013 N 504 "O vzimanii platy v schet vozmeshcheniya vreda, prichinyaemogo avtomobil'nym dorogam obshchego pol'zovaniya federal'nogo znacheniya transportnymi sredstvami, imeyushchimi razreshennuyu maksimal'nuyu massu svyshe 12 tonn". (In Russian).