

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 665.6/.7:502.171

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-47-68

Анализ показателей масштабирования при оценке ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе метода DEA*

М.Ю. ДЕРЕВЯНОВ

*443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный техни-
ческий университет*

mder2007@mail.ru

В статье предлагается новый подход к оценке ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов (НСО) на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA) с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба и сравнительный анализ показателей масштабирования, используемых при выборе наилучших объектов системы переработки НСО в процессе принятия обоснованных управленческих решений. Разработан четырехэтапный алгоритм расчета, в котором на первом этапе определяются оценки ресурсной ценности НСО в хранилищах. На втором и третьем этапах рассчитываются оценки ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба соответственно, а также эффект масштаба (постоянный, возрастающий или убывающий), характеризующий качественную оценку масштабных свойств объектов системы переработки НСО. На четвертом этапе определяется оценка эффективности масштабирования, которая характеризует величину влияния масштаба технологических операций на эффективность переработки НСО в анализируемой системе, и оптимальная последовательность переработки НСО в хранилищах по критерию повышения ресурсного потенциала объектов системы с учетом показателей масштабирования.

На примере системы переработки НСО в Самарском регионе рассчитаны оценки ресурсной ценности НСО в хранилищах, оценки ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» и соответствующие показатели масштабирования (эффект масштаба и оценка эффективности масштабирования). Проведено сравнение двух оптимальных последовательностей по критерию повышения ресурсного потенциала объектов системы с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба и показано, каким образом показатели масштабирования могут влиять на принятие обоснованных управленческих решений.

Ключевые слова: нефтесодержащие отходы, система переработки, технологии, ресурсный потенциал, ресурсная ценность, эффект масштаба, эффективность масштабирования, Data Envelopment Analysis

* Статья получена 26 июня 2023 г.

ВВЕДЕНИЕ

По данным Росстата, с 2003 по 2021 год в Российской Федерации образовалось около 93,6 млрд тонн отходов производства и потребления, из которых 2,6 млрд тонн (2,8 %) относятся к опасным (с I по IV класс) [1]. Нефтепродукты (НПО), большая часть которых относится к III и IV классу опасности [2], образуются при строительстве нефтяных и газовых скважин, промышленной эксплуатации месторождений, переработке нефти и газа, очистке пластовых и сточных вод, содержащих нефтепродукты, при чистке резервуаров, нефтеловушек, прудов-отстойников, насосов, труб, нефтеналивных цистерн и другого оборудования [3]. При этом, по данным Минприроды РФ, масса загрязненного НПО грунта ежегодно увеличивается в среднем на 510 млн тонн [4]. К 2023 году в России отсутствовали законодательно утвержденные нормы утилизации и обезвреживания НПО, поэтому официальные статистические данные по объемам образования отходов этой категории отсутствуют. Большую часть отходов в секторах добычи нефти и газа и в предоставлении услуг в этой сфере составляют НПО, общая масса которых в 2021 году составила 14,15 млн тонн, из которых утилизации подверглись только 4,37 млн тонн (30,9 %), а остальная часть размещена в хранилищах и захоронена на специальных полигонах [1]. Общее количество таких полигонов уже превысило 20 тысяч штук, и общая их площадь ежегодно увеличивается примерно на 400 тысяч га [4]. К негативному антропогенному влиянию на окружающую среду полигонов и хранилищ добавляются неэкологичные технологии утилизации и обезвреживания НПО, основной из которых в настоящее время в России является сжигание [5]. Мировой опыт показывает [6–8], что глубину переработки НПО за счет применения современных технологий и обоснованных управленческих решений можно довести до 90 %, тогда как в России она не превышает 10 % [9].

Масштабное нарастание экологических проблем и неэффективное использование ресурсного потенциала НПО и технологий их переработки приводят к нерациональным потерям углеводородов, которые можно использовать в процессах рециклинга, рекуперации и регенерации при производстве битумных смесей [10], строительных материалов [11], топлива для котельных установок [12] и др. [13, 14].

Под ресурсным потенциалом понимается оценка, характеризующая эффективность извлечения полезных для вторичного использования компонентов НПО с помощью соответствующей технологии переработки с учетом ресурсной ценности отхода. Ресурсная ценность НПО определяется из соотношения полезных и вредных компонентов в отходе и характеризует интегральную сравнительную оценку его применимости в качестве материального и (или) энергетического ресурса.

Вышесказанное свидетельствует о необходимости принятия срочных мер по формированию обоснованных управленческих решений в системе переработки НПО. Двухэтапный подход к определению ресурсного потенциала объектов в системе переработки НПО на основе известного метода Data Envelopment Analysis (DEA) [15] описан в [16], где объектами являются хранилища отходов и технологические установки с соответствующей инфраструктурой. Размеры такой системы определяются географической локализацией мест хранения отходов и (или) размещения технологических установок. Авторами

в [17] представлен подход к анализу ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного эффекта масштаба и влияния оценки ресурсной ценности отходов на принятие управленческих решений. Недостатком этого подхода является учет постоянного эффекта масштаба, суть которого заключается в предположении о пропорциональном изменении объема получаемых из НСО углеводородов, необходимых для вторичного использования, при соответствующем изменении временных затрат, расхода реагентов и энергии (топлива) на переработку. Оценки ресурсного потенциала с учетом постоянного эффекта масштаба соответствуют общей технической эффективности процесса переработки НСО и показывают, насколько хорошо производственный процесс преобразует затрачиваемые на переработку временные и материальные ресурсы в полезные углеводороды без существенной связи между масштабом технологических операций и эффективностью переработки.

В статье предлагается новый подход к оценке ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба на основе метода DEA, а также сравнительный анализ показателей масштабирования (эффект масштаба и эффективность масштабирования), используемых при выборе наилучших объектов системы переработки НСО в процессе принятия обоснованных управленческих решений. Оценки ресурсного потенциала с учетом переменного эффекта масштаба соответствуют чистой технической эффективности процесса переработки отходов и демонстрируют связь эффективности переработки с масштабом технологических операций.

Анализ показателей масштабирования при исследовании различного рода объектов методом DEA достаточно широко применяется в экономике [18], здравоохранении [19], энергетике [20] и других областях [21–23]. Примеры использования подобного анализа в области переработки НСО автору неизвестны.

Эффективность масштабирования в работе определяется путем сопоставления оценок ресурсного потенциала с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба (общей и чистой технической эффективности процесса переработки, соответственно) и характеризует величину влияния масштаба технологических операций на эффективность переработки НСО в хранилищах. Эффект масштаба демонстрирует качественный характер зависимости объема получаемых углеводородов (производительность технологии) пропорционально (постоянный эффект масштаба) или непропорционально (убывающий или возрастающий эффект масштаба) затраченному времени и ресурсам на переработку НСО в хранилище.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА

1.1. АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА

Предлагаемый новый способ определения оценок ресурсного потенциала объектов системы переработки НСО и принятия управленческих решений с учетом показателей масштабирования основан на двухэтапном подходе, рассмотренном в [17], и может быть представлен в виде алгоритма (рис. 1).

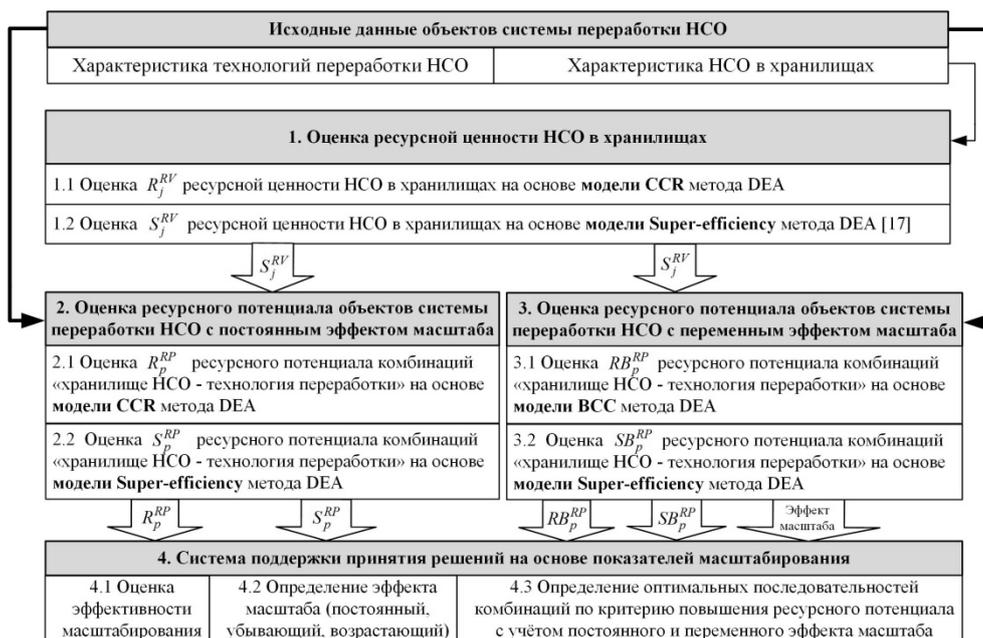


Рис. 1. Алгоритм определения оценок ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» и принятия управленческих решений с учетом показателей масштабирования

Fig. 1. An algorithm for determining estimates of the resource potential of the combinations “OCW storage – recycling technology” and making management decisions taking into account scaling indicators

Представленный алгоритм проведения анализа основан на использовании входоориентированных моделей CCR [24], BCC [25] и Super-efficiency [26] метода DEA и состоит из четырех этапов, которые подробно будут рассмотрены в разделах 1.2–1.4.

1.2. ОЦЕНКА РЕСУРСНОЙ ЦЕННОСТИ НСО В ХРАНИЛИЩАХ

Определение оценки ресурсной ценности НСО в хранилищах (этап 1 на рис. 1) проводится на основе двух взаимосвязанных задач математического программирования (ЗМП): ЗМП 1.1 сформулирована на базе CCR модели метода DEA и рассмотрена в [27]; ЗМП 1.2 сформулирована на базе модели Super-efficiency метода DEA и рассмотрена в [17].

В ЗМП 1.1 и 1.2 входными параметрами является средневзвешенное содержание компонентов НСО (воды, асфальтенов и смол, минеральных и механических примесей, серы), не подходящих для дальнейшего использования и переработки. Выходным параметром является средневзвешенное содержание углеводов в отходе, полезных для дальнейшего использования.

Результатом решения ЗМП 1.2 на основе модели Super-efficiency метода DEA являются сравнительные оценки S_j^{RV} ($j = \overline{1, N}$) ресурсной ценности НСО в N хранилищах, которые используются на этапах 2 и 3 алгоритма (рис. 1) в качестве сравнительного параметра для определения оценок ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки», рассмат-

риваемых в качестве объектов сравнения в системе переработки НСО. Максимальная оценка S_j^{RV} в анализируемой группе соответствует наилучшему по компонентному составу хранилищу НСО, обладающему наиболее ценными ресурсами для вторичного использования.

1.3. ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ОБЪЕКТОВ СИСТЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ НСО

Определение оценок ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» (этап 2 на рис. 1) с учетом постоянного эффекта масштаба основано на взаимосвязанном решении ЗМП 2.1 и 2.2.

ЗМП 2.1 на основе CCR модели метода DEA имеет вид

$$RC_{\varphi}^{RP} = \sum_{r=1}^R w_{r\varphi} y_{r\varphi} \rightarrow \max_{W, H} \quad (1)$$

при условии

$$\begin{cases} \sum_{\mu=1}^M h_{\mu\varphi} x_{\mu\varphi} = 1, \\ \sum_{r=1}^R w_{rp} y_{rp} - \sum_{\mu=1}^M h_{\mu p} x_{\mu p} \leq 0, \\ h_{\mu p} \geq 0, w_{rp} \geq 0, p = \overline{1, P}, \mu = \overline{1, M}, r = \overline{1, R}. \end{cases} \quad (2)$$

ЗМП 2.2 на основе модели Super-efficiency метода DEA имеет вид

$$SC_{\varphi}^{RP} = \sum_{r=1}^R \tilde{w}_{r\varphi} y_{r\varphi} \rightarrow \max_{\tilde{W}, \tilde{H}} \quad (3)$$

при условии

$$\begin{cases} \sum_{\mu=1}^M \tilde{h}_{\mu\varphi} x_{\mu\varphi} = 1, \\ \sum_{r=1}^R \tilde{w}_{rp} y_{rp} - \sum_{\mu=1}^M \tilde{h}_{\mu p} x_{\mu p} \leq 0, \\ \tilde{h}_{\mu p} \geq 0, \tilde{w}_{rp} \geq 0, p \neq f, p = \overline{1, P}, \mu = \overline{1, M}, r = \overline{1, R}, f = \overline{1, F}. \end{cases} \quad (4)$$

В ЗМП (1)–(2) и (3)–(4) приняты следующие обозначения:

$RC_p^{RP} = RC_{\varphi}^{RP}$ и $SC_p^{RP} = SC_{\varphi}^{RP}$ – оценки ресурсного потенциала p -й комбинации «хранилище НСО – технология переработки», $p = \overline{1, P}$, по модели CCR и Super-efficiency соответственно;

P – общее число возможных комбинаций (объектов сравнения) в системе, включающей N хранилищ и T технологий переработки НСО;

φ – индекс целевого объекта сравнения из множества $\varphi = \overline{1, P}$, ресурсный потенциал которого оценивается;

$x_{\mu\varphi}$, $\mu = \overline{1, M}$ и $y_{r\varphi}$, $r = \overline{1, R}$ – значения входных и выходных параметров для целевого объекта в анализируемой системе соответственно; R – число анализируемых выходных параметров; M – число анализируемых входных параметров; $x_{\mu p}$ и y_{rp} – значения входных и выходных параметров для каждого p -го объекта, $p = \overline{1, P}$;

$h_{\mu p}$, $\tilde{h}_{\mu p}$ и w_{rp} , \tilde{w}_{rp} – весовые коэффициенты для входных и выходных параметров соответственно в ЗМП (1)–(2) и (3)–(4);

f – порядковый номер объекта со значением оценки ресурсного потенциала $RC_f^{RP} = 1$, $f = \overline{1, F}$, в анализируемой группе из P объектов, полученной на основе решения ЗМП (1)–(2), который исключается из системы (4), где F – число объектов со значением оценки $RC_f^{RP} = 1$, $f = \overline{1, F}$.

Определение оценок ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» (этап 3 на рис. 1) с учетом переменного эффекта масштаба основано на взаимосвязанном решении ЗМП 3.1 и 3.2.

ЗМП 3.1 на основе ВСС модели метода DEA имеет вид

$$RB_{\varphi}^{RP} = \sum_{r=1}^R q_{r\varphi} y_{r\varphi} - \delta_{\varphi} \rightarrow \max_{Q, G} \quad (5)$$

при условии

$$\begin{cases} \sum_{\mu=1}^M g_{\mu\varphi} x_{\mu\varphi} = 1, \\ \sum_{r=1}^R q_{rp} y_{rp} - \sum_{\mu=1}^M g_{\mu p} x_{\mu p} - \delta_p \leq 0, \\ g_{\mu p} \geq 0, q_{rp} \geq 0, p = \overline{1, P}, \mu = \overline{1, M}, r = \overline{1, R}. \end{cases} \quad (6)$$

ЗМП 3.2 на основе Super-efficiency метода DEA имеет вид

$$SB_{\varphi}^{RP} = \sum_{r=1}^R \tilde{q}_{r\varphi} y_{r\varphi} - \delta_{\varphi} \rightarrow \max_{Q, G} \quad (7)$$

при условии

$$\begin{cases} \sum_{\mu=1}^M \tilde{g}_{\mu p} x_{\mu p} = 1, \\ \sum_{r=1}^R \tilde{q}_{rp} y_{rp} - \sum_{\mu=1}^M \tilde{g}_{\mu p} x_{\mu p} - \delta_p \leq 0, \\ \tilde{g}_{\mu p} \geq 0, \tilde{q}_{rp} \geq 0, k \neq p, p = \overline{1, P}, \mu = \overline{1, M}, r = \overline{1, R}, k = \overline{1, K}. \end{cases} \quad (8)$$

В ЗМП (5)–(6) и (7)–(8) приняты следующие обозначения:

$RB_p^{RP} = RB_{\phi}^{RP}$ и $SB_p^{RP} = SB_{\phi}^{RP}$ – оценки ресурсного потенциала p -й комбинации «хранилище НСО – технология переработки», $p = \overline{1, P}$, по модели

ВСС и Super-efficiency соответственно;

$g_{\mu p}, \tilde{g}_{\mu p}$ и q_{rp}, \tilde{q}_{rp} – весовые коэффициенты для входных и выходных параметров соответственно в ЗМП (5)–(6) и (7)–(8);

k – порядковый номер объекта со значением оценки ресурсного потенциала $RB_k^{RP} = 1$, $k = \overline{1, K}$, в анализируемой группе из P объектов, полученной на основе решения ЗМП (5)–(6), который исключается из системы (8), где K – число объектов со значением оценки $RB_k^{RP} = 1$, $k = \overline{1, K}$;

$\delta_{\phi} = \delta_p$ – свободная переменная, величина или знак которой характеризует тип эффекта масштаба для p -го объекта сравнения:

- при $\delta_p = 0$ наблюдается *постоянный* эффект масштаба, означающий пропорциональное изменение входных $x_{\mu p}$ и выходных y_{rp} параметров в (5)–(6);

- при $\delta_p < 0$ наблюдается *убывающий* эффект масштаба, означающий, что изменение входных параметров $x_{\mu p}$ приводит к относительно меньшему изменению выходных параметров y_{rp} в (5)–(6);

- при $\delta_p > 0$ наблюдается *возрастающий* эффект масштаба, означающий, что изменение входных параметров $x_{\mu p}$ приводит к относительно большему изменению выходных параметров y_{rp} в (5)–(6).

В ЗМП 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2 используются одинаковые входные и выходные параметры. Входными параметрами $x_{\mu p}$, $\mu = \overline{1, 3}$, $p = \overline{1, P}$, увеличение которых приводит к снижению оценки ресурсного потенциала объектов системы, являются: x_{1p} – время переработки НСО, ч; x_{2p} – масса реагентов, т; x_{3p} – расход энергии (топлива), т. Выходными параметрами y_{rp} , $r = \overline{1, 2}$, $p = \overline{1, P}$, увеличение которых приводит к увеличению оценки ресурсного потенциала объектов системы, являются: y_{1p} – масса полезных продуктов

рециклинга, т; $y_{2p} = S_j^{RV}$ – соответствующая оценка ресурсной ценности НСО в j -м хранилище, полученная в ходе решения ЗМП 1.2, рассмотренной в [17].

Каждая из ЗМП 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2 решается P раз, т.е. для каждого p -го объекта сравнения отдельно, при этом в каждой задаче рассчитываются соответствующие значения оценок $(RC_p^{RP}, RB_p^{RP}, SC_p^{RP}, SB_p^{RP})$ и весовых коэффициентов $(h_{\mu p}, \tilde{h}_{\mu p}, w_{rp}, \tilde{w}_{rp}, g_{\mu p}, \tilde{g}_{\mu p}, q_{rp}, \tilde{q}_{rp}, \delta_p)$. Относительные оценки RC_p^{RP} и RB_p^{RP} ресурсного потенциала объектов системы переработки распределяются в интервале $(0;1]$, а оценки SC_p^{RP} и SB_p^{RP} ресурсного потенциала – в интервале $(0; \infty)$. Объекты, получившие максимальные оценки SC_p^{RP} и SB_p^{RP} , являются наилучшими в анализируемой группе из P комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба соответственно.

1.4. ПОКАЗАТЕЛИ МАСШТАБИРОВАНИЯ

На четвертом этапе анализа (рис. 1) необходимо определить показатели масштабирования, которые используются в системе поддержки принятия решений.

В разделе 1.3 рассмотрены правила определения эффекта масштаба, который является качественной оценкой масштабных свойств объектов системы переработки НСО. Различают объекты с постоянным, убывающим и возрастающим эффектом масштаба. В соответствии с теорией метода DEA [15] объекты с постоянным эффектом масштаба имеют неизменное соотношение объема затраченных ресурсов к объему получаемых полезных углеводов. Убывающий эффект масштаба соответствует объектам, в которых потенциальный получаемый объем углеводов из НСО оказывается меньше затраченных на его переработку ресурсов. Возрастающий эффект масштаба соответствует объектам системы переработки отходов с потенциально большей отдачей полезных углеводов с учетом того же объема затраченных ресурсов. Информация об эффекте масштаба может учитываться дополнительно при принятии управленческих решений.

Для определения оценки SE_p эффективности масштабирования p -й комбинации «хранилище НСО – технология переработки», которая демонстрирует влияние масштабных свойств технологических операций на эффективность переработки, необходимо использовать результаты решения ЗМП 2.1 и 3.1 соответственно в виде оценок RC_p^{RP} и RB_p^{RP} ресурсного потенциала [28]:

$$SE_p = \frac{RC_p^{RP}}{RB_p^{RP}} \Rightarrow RC_p^{RP} = RB_p^{RP} SE_p, \quad SE_p \leq 1. \quad (9)$$

Если p -й объект сравнения обладает максимальным ресурсным потенциалом $(RC_p^{RP} = RB_p^{RP} = 1)$, то масштаб технологических операций не влияет на

процесс переработки отходов в хранилище и оценка эффективности масштабирования максимальна $SE_p = 1$.

Если $RB_p^{RP} < 1$, то источником неэффективности является низкая эффективность технологии переработки. При $SE_p < 1$ источником неэффективности является несоответствие масштаба технологических операций эффективности переработки НСО в хранилище.

Если p -й объект сравнения имеет максимальную оценку ресурсного потенциала соответствующей чистой технической эффективности переработки ($RB_p^{RP} = 1$), но низкую оценку общей технической эффективности переработки ($RC_p^{RP} < 1$), то он является локально эффективным без учета масштаба технологических операций.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Для апробации разработанной методики рассмотрим систему переработки НСО, находящуюся на территории Самарской области и включающую $N = 20$ хранилищ отходов и $T = 10$ технологий переработки, подробные характеристики которых представлены в [17]. В качестве объектов сравнения будут рассматриваться $P = 200$ возможных комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» (объектов сравнения). Расчеты для ЗМП 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 проведены с помощью специализированного программного обеспечения [29], а для ЗМП 3.1, 3.2 – с использованием бесплатного программного обеспечения MaxDEA Basic [30].

Рассчитанные в [17] оценки S_j^{RV} , $j = \overline{1, 20}$, ресурсной ценности НСО в 20 хранилищах анализируемой системы получены путем решения задач аналогичных ЗМП 1.1 и 1.2 на первом этапе алгоритма (рис. 1).

В табл. 1 представлены статистические данные входных и выходных параметров для $p = \overline{1, 200}$ комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» в соответствующих ЗМП (раздел 1.3) методом DEA на втором и третьем этапе алгоритма (рис. 1). Общий объем НСО в 20 хранилищах (общей площадью около 25 тыс. м²), подлежащих переработке, составляет 69.337 тыс. тонн. Производительность 10 технологий в составе системы переработки варьируется от 1.5 до 50 тонн НСО в час. В технологических установках используется дизельное топливо или электрическая энергия, при этом расход реагентов и топлива (энергии) для проведения расчетов нормирован относительно стоимости дизельного топлива [17].

Из табл. 1 видно, что существует большой разброс по всем анализируемым параметрам, что указывает на неоднородность масштаба объектов системы и подтверждается наблюдением за стандартным отклонением, минимальными и максимальными значениями в выборке. Минимальное значение массы реагентов ($x_{2p} = 0$) объясняется тем, что не все технологии используют реагенты в процессе переработки.

При анализе парных корреляционных зависимостей отдельно по каждой технологии в отношении переработки всех НСО в хранилищах для входных

x_{ip} , $i = \overline{1,3}$, и выходного параметра y_{1p} установлена сильная положительная связь (значение коэффициента корреляции Спирмена [31] для каждой из 10 технологий системы переработки составляет 0.94 при значимости на уровне 1 %). Это указывает на то, что масса получаемых углеводов y_{1p} в основном зависит от изменения времени переработки и затраченных ресурсов x_{ip} , $i = \overline{1,3}$. Обоснование использования оценки ресурсной ценности $y_{2p} = S_j^{RV}$ в методе DEA и оценка ее влияния на ресурсный потенциал объектов системы приведены в [17]. Таким образом, считается, что входные и выходные параметры для оценки ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» в анализируемой системе переработки выбраны обоснованно.

Таблица 1

Table 1

Основные статистические данные входных и выходных параметров в задачах оценки ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки»

Basic statistical data of input and output parameters in the problems of assessing the resource potential of combinations "Oil-contaminated wastes storage – recycling technology"

Наименование параметра, ед. изм.	Время переработки НСО, ч	Масса реагентов, т	Расход энергии (топлива), т	Масса углеводов, т	Оценка ресурсной ценности НСО
Обозначение в ЗМП	x_{1p}	x_{2p}	x_{3p}	y_{1p}	$y_{2p} = S_j^{RV}$
Минимальное	8.008	0	0.036	13.833	0.205
Максимальное	16301.13	57150.29	1589.36	4206.81	1.702
Среднее	711.86	968.72	46.33	508.87	0.574
Стандартное отклонение	1767.26	4628.49	157.41	758.85	0.357

В табл. 2 представлены статистические данные по оценкам RC_p^{RP} , SC_p^{RP} , RB_p^{RP} , SB_p^{RP} ресурсного потенциала объектов системы как результаты решения ЗМП 2.1, 2.2 и ЗМП 3.1, 3.2 соответственно, а также по оценке SE_p эффективности масштабирования.

Результаты в табл. 2 показывают, что неэффективность некоторых комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» достигает 98.6 %, что видно по значению минимальной оценки ресурсного потенциала по всем моделям метода DEA, равной 0.014. При этом доля полностью эффективных комбинаций без учета эффекта масштаба достигает 9.5 % (модель ВСС), что свидетельствует о наличии эффективных технологий переработки. Этот факт подтверждается достаточно высоким средним значением оценки SE_p эффективности масштабирования, равным 88.2 %, что соответствует среднему уровню неэффективности 11.8 % объектов в системе переработки НСО.

В анализируемой системе переработки возрастающий эффект масштаба демонстрируют 73 % объектов, в то время как убывающий и постоянный 20.5 % и 6.5 % объектов соответственно (рис. 2).

Таблица 2

Table 2

Основные статистические данные по оценкам ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба методом DEA

Basic statistical data for assessing the resource potential of combinations “Oil-contaminated wastes storage – recycling technology” taking into account constant and variable scale effects by the DEA method

Наименование оценки	Оценки ресурсного потенциала объектов системы с постоянным эффектом масштаба		Оценки ресурсного потенциала объектов системы с переменным эффектом масштаба		Оценка эффективности масштабирования
	CCR, (1)–(2)	Super-efficiency, (3)–(4)	BCC, (5)–(6)	Super-efficiency, (7)–(8)	
Модель метода DEA, формулы	CCR, (1)–(2)	Super-efficiency, (3)–(4)	BCC, (5)–(6)	Super-efficiency, (7)–(8)	– (9)
Номер ЗМП	2.1	2.2	3.1	3.2	–
Обозначение	RC_p^{RP}	SC_p^{RP}	RB_p^{RP}	SB_p^{RP}	SE_p
Минимальная	0.014	0.014	0.014	0.014	0.365
Максимальная	1	1.322	1	9.529	1
Средняя	0.481	0.493	0.547	0.756	0.882
Стандартное отклонение	0.302	0.325	0.324	1.179	0.149
Доля эффективных комбинаций с оценкой ≥ 1 , %	6.5	6.5	9.5	9.5	6.5

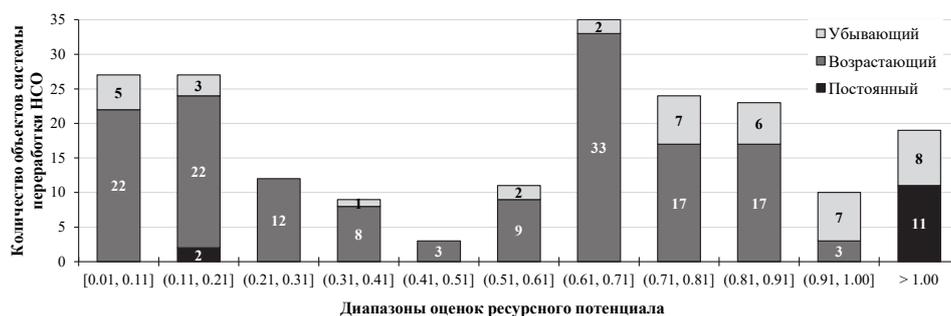


Рис. 2. Распределение объектов системы переработки НСО по диапазонам оценок SB_p^{RP} ресурсного потенциала с переменным эффектом масштаба

Fig. 2. Distribution of objects of the oil-contaminated waste recycling system by ranges of resource potential estimates SB_p^{RP} with variable scale effects

Средняя оценка RB_p^{RP} ресурсного потенциала по модели ВСС (чистая техническая эффективность) в анализируемой системе составляет 54.7%. Это указывает на то, что затраты времени и ресурсов на переработку могут быть снижены на 45.3% при неизменном объеме получаемых углеводородов и оценке S_j^{RV} ресурсной ценности в хранилищах. Однако этот вывод для предлагаемого подхода является неверным, так как в качестве объектов в системе переработки НСО рассматриваются все возможные комбинации «хранилище НСО – технология переработки», что является обоснованным с точки зрения полноты охвата возможных вариантов и высокой точности получения сравнительной оценки ресурсного потенциала, но недостаточным для принятия конкретных управляющих решений, потому что невозможно переработать НСО в хранилищах несколько раз разными технологиями.

Для устранения обнаруженного противоречия предлагается рассмотреть решение и сравнить результаты двух оптимизационных задач по выбору в системе переработки эффективных комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» по критерию повышения ресурсного потенциала. Решение первой задачи основано на ранжировании оценок SC_p^{RP} ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного эффекта масштаба и выборе из них максимальных, определяющих последовательность № 1 хранилищ НСО, подлежащих переработке соответствующими технологиями (табл. 3). При этом ограничение на повторное использование технологии не применяется. Аналогичным образом решается вторая задача на основе ранжирования оценок SB_p^{RP} ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом переменного эффекта масштаба (табл. 4), определяющая последовательность № 2 переработки НСО. Полученные в ходе решения этих задач оптимальные последовательности № 1 и № 2 позволяют полностью переработать НСО в хранилищах анализируемой системы с различной эффективностью масштабирования, затратами и качеством.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что вариативность применения технологий переработки НСО достаточно невысокая: последовательность № 1 (табл. 3) включает три ($n = 2, 8, 9$) технологии, а последовательность № 2 (табл. 4) – четыре ($n = 2, 8, 7, 9$). Большинство НСО планируется переработать с использованием технологии $n = 8$: в последовательности № 1 – 17 хранилищ, в последовательности № 2 – 14 хранилищ. Анализируя эффект масштаба, можно констатировать, что количество комбинаций с постоянным эффектом масштаба в обеих последовательностях совпадает и равно 2. В последовательности № 1 количество комбинаций с возрастающим эффектом масштаба равно 10, с убывающим – 8. В последовательности № 2 количество комбинаций с возрастающим и убывающим эффектом масштаба распределено поровну – по 9.

Таблица 3

Table 3

Оптимальная последовательность № 1 комбинаций с учётом постоянного эффекта масштаба

Optimal sequence No. 1 of combinations based on a constant effect of scale

Номер комбинации	Номер хранилища НСО	Номер технологии	Оценки ресурсного потенциала объектов системы				Оценка эффективности масштабирования	Эффект масштаба
			с постоянным эффектом масштаба		с переменным эффектом масштаба			
p	j	n	RC_p^{RP}	SC_p^{RP}	RB_p^{RP}	SB_p^{RP}	SE_p	
152	16	2	1	1.322	1	1.954	1	Постоянный
109	11	9	1	1.186	1	2.745	1	Постоянный
179	18	9	0.975	0.975	0.978	0.978	0.997	Убывающий
198	20	8	0.897	0.897	0.924	0.924	0.971	Убывающий
128	13	8	0.885	0.885	0.886	0.886	0.999	Убывающий
88	9	8	0.882	0.882	0.889	0.889	0.992	Убывающий
148	15	8	0.837	0.837	0.844	0.844	0.991	Убывающий
58	6	8	0.835	0.835	0.838	0.838	0.996	Убывающий
78	8	8	0.830	0.830	0.841	0.841	0.987	Убывающий
168	17	8	0.818	0.818	0.924	0.924	0.885	Возрастающий
118	12	8	0.811	0.811	0.829	0.829	0.979	Возрастающий
68	7	8	0.805	0.805	0.814	0.814	0.989	Возрастающий
98	10	8	0.789	0.789	0.813	0.813	0.970	Возрастающий
18	2	8	0.782	0.782	0.819	0.819	0.955	Возрастающий
188	19	8	0.781	0.781	0.811	0.811	0.963	Возрастающий
138	14	8	0.779	0.779	0.793	0.793	0.982	Возрастающий
28	3	8	0.770	0.770	0.838	0.838	0.919	Убывающий
48	5	8	0.770	0.770	0.783	0.783	0.982	Возрастающий
38	4	8	0.770	0.770	0.778	0.778	0.990	Возрастающий
8	1	8	0.770	0.770	0.777	0.777	0.990	Возрастающий
Сумма			16.78	17.29	17.18	19.88	19.54	–

Для анализируемой системы переработки НСО учет эффекта масштаба при принятии управленческих решений может использоваться в случае, если требуется получить максимальный объем полезных углеводородов и общее время переработки отходов в системе не ограничено. Тогда в первую очередь следует перерабатывать НСО, входящие в комбинации «хранилище НСО – технология переработки» с убывающим эффектом масштаба, так как при потенциальном увеличении объема НСО в таких хранилищах будет наблюдаться снижение соответствующего объема полезных углеводородов после переработки. Во вторую очередь следует перерабатывать НСО из комбинаций с постоянным эффектом масштаба, потому что они не зависят от временного

фактора и затраченные ресурсы на переработку пропорциональны получаемому объему полезных углеводородов. Переработку НСО из хранилищ, входящих в комбинации с возрастающим эффектом масштаба, следует отложить, и рекомендуется продолжить накапливать в них отходы, чтобы иметь потенциальную возможность увеличения объема полезных углеводородов после переработки.

Таблица 4

Table 4

Оптимальная последовательность № 2 комбинаций с учетом постоянного эффекта масштаба

Optimal sequence No. 2 of combinations based on a variable effect of scale

Номер комбинации	Номер хранилища НСО	Номер технологии	Оценки ресурсного потенциала объектов системы				Оценка эффективности масштабирования	Эффект масштаба
			с постоянным эффектом масштаба		с переменным эффектом масштаба			
p	j	n	RC_p^{RP}	SC_p^{RP}	RB_p^{RP}	SB_p^{RP}	SE_p	
102	11	2	1	1.140	1	9.529	1	Постоянный
22	3	2	0.397	0.397	1	9.529	0.397	Убывающий
152	16	2	1	1.322	1	1.954	1	Постоянный
178	18	8	0.940	0.940	0.994	0.994	0.946	Убывающий
198	20	8	0.897	0.897	0.924	0.924	0.971	Убывающий
168	17	8	0.818	0.818	0.924	0.924	0.885	Возрастающий
129	13	9	0.737	0.737	0.918	0.918	0.803	Возрастающий
88	9	8	0.882	0.882	0.889	0.889	0.992	Убывающий
148	15	8	0.837	0.837	0.844	0.844	0.991	Убывающий
78	8	8	0.830	0.830	0.841	0.841	0.987	Убывающий
58	6	8	0.835	0.835	0.838	0.838	0.996	Убывающий
118	12	8	0.811	0.811	0.829	0.829	0.979	Возрастающий
18	2	8	0.782	0.782	0.819	0.819	0.955	Возрастающий
68	7	8	0.805	0.805	0.814	0.814	0.989	Возрастающий
98	10	8	0.789	0.789	0.813	0.813	0.970	Возрастающий
188	19	8	0.781	0.781	0.811	0.811	0.963	Возрастающий
7	1	7	0.623	0.623	0.803	0.803	0.776	Убывающий
37	4	7	0.623	0.623	0.796	0.796	0.783	Убывающий
138	14	8	0.779	0.779	0.793	0.793	0.982	Возрастающий
48	5	8	0.770	0.770	0.783	0.783	0.982	Возрастающий
Сумма			15.93	16.40	17.43	35.44	18.35	–

Таким образом, последовательность № 1 (см. табл. 3) обладает потенциально большими возможностями по извлечению из НСО полезных углеводородов за счет большего количества комбинаций с возрастающим эффектом масштаба.

Суммарные показатели по анализируемым параметрам показывают, что последовательность № 1 позволяет переработать все НСО в хранилищах быстрее на 96.13 % и с меньшими в 14.5 раза затратами топлива (энергии) по сравнению с последовательностью № 2, которая, в свою очередь, позволяет получить углеводородов больше на 162.17 % и затратить в 2.24 раза меньше реагентов. В итоге результаты анализа по статистике использования технологий, эффекту масштаба, затраченным ресурсам и полученному результату не позволяют однозначно определить лучшую из рассматриваемых последовательностей № 1 и № 2, и для принятия обоснованных управленческих решений в системе переработки НСО требуется учитывать масштабные показатели.

Сравнивая статистические данные параметров объектов системы переработки НСО (табл. 5), можно увидеть, что в последовательности № 1 средняя неэффективность масштабирования в комбинациях составляет только 2.3 % против 8.3 % у последовательности № 2, при этом стандартное отклонение оценки SE_p эффективности масштабирования у последовательности № 2 выше, чем у последовательности № 1 (0.143 против 0.029 соответственно). Таким образом, выбор для переработки последовательности № 1 по совокупности масштабных показателей (большее количество комбинаций с возрастающим эффектом масштаба и средняя оценка эффективности масштабирования) является наилучшим решением среди анализируемых вариантов.

Таблица 5

Table 5

Основные статистические данные оптимальных последовательностей комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» по критерию повышения ресурсного потенциала с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба

The main statistical data of the optimal sequences of combinations “Oil-contaminated wastes storage – recycling technology” according to the criterion of increasing the resource potential, taking into account constant and variable scale effect

Наименование оценки	Оценки ресурсного потенциала объектов системы с постоянным эффектом масштаба		Оценки ресурсного потенциала объектов системы с переменным эффектом масштаба		Оценка эффективности масштабирования
	RC_p^{RP}	SC_p^{RP}	RB_p^{RP}	SB_p^{RP}	
Обозначение					SE_p
Оптимальная последовательность № 1					
Минимальная	0.770	0.770	0.777	0.777	0.885
Максимальная	1	1.322	1	2.745	1
Средняя	0.839	0.864	0.859	0.994	0.977
Стандартное отклонение	0.077	0.145	0.072	0.484	0.029
Оптимальная последовательность № 2					
Минимальная	0.397	0.397	0.783	0.783	0.397
Максимальная	1	1.322	1	9.529	1
Средняя	0.797	0.820	0.872	1.772	0.917
Стандартное отклонение	0.136	0.185	0.078	2.665	0.143

Подводя итог анализа, можно сделать вывод о том, что учет эффекта масштаба и средней оценки эффективности масштабирования позволяет обосновать принятие управленческих решений в системе переработки НСО, если другие показатели переработки являются неочевидными или неоднозначными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы разработан алгоритм определения оценок ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» и принятия управленческих решений с учетом показателей масштабирования. Приведена математическая постановка ЗМП по моделям ССР, ВСС и Super-efficiency метода DEA, решение которых позволяет получить оценки ресурсного потенциала объектов системы переработки, ранжировать их и определить наилучшие комбинации «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба. Показан способ определения эффекта масштаба в модели ВСС и расчета оценки эффективности масштабирования, которые позволяют дополнительно обосновывать принимаемые управленческие решения.

На примере системы переработки НСО Самарской области представлены анализ исходных параметров и результатов расчета оценок ресурсного потенциала объектов на основе статистических данных и последовательность принятия обоснованных управленческих решений по переработке с учетом показателей масштабирования. Разработанный подход может быть распространен на системы переработки отходов в других регионах Российской Федерации.

Направление дальнейших исследований по этой тематике может включать рассмотрение эластичности масштабирования в качестве количественного показателя эффекта масштаба и проведение сравнительного анализа результатов решения оптимизационных задач по повышению ресурсного потенциала объектов системы переработки НСО с учетом ограничений на общее время процесса и использование технологий, параллельной переработки отходов и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окружающая среда. Отходы производства и потребления: официальная статистика // Федеральная служба государственной статистики РФ: сайт. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 29.08.2023).
2. СП 2.1.7.1386-03. Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления.
3. *Кративский Е.И.* Нефтешламы: уничтожение, утилизация, дезактивация. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 432 с.
4. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. – 684 с.
5. ГОСТ Р 56828.43–2018. Наилучшие доступные технологии. Утилизация и обезвреживание нефтесодержащих отходов. Показатели для идентификации. – М.: Стандартинформ, 2018.

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. – P. 11–32. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

7. Comprehensive characterization of an oily sludge from a petrol refinery: A step forward for its valorization within the circular economy strategy / S. Jerez, M. Ventura, R. Molina, M.I. Pariente, F. Martínez, J.A. Melero // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – Vol. 285. – P. 112124. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112124.

8. Circular economy potential and contributions of petroleum industry sludge utilization to environmental sustainability through engineered processes – A review / A.H. Jagaba, S.R.M. Kutty, I.M. Lawal, A.H. Bimiwa, A.C. Affam, N.S.A. Yaro, A.K. Usman, I. Umaru, S. Abubakar, A. Noor, U.B. Soja, A.S. Yakubu // *Cleaner and Circular Bioeconomy*. – 2022. – Vol. 3. – P. 100029. – DOI: 10.1016/j.clcb.2022.100029.

9. Мазлова Е.А., Мецержаков С.В. Проблемы утилизации нефтешламов и способы их переработки. – М.: Ноосфера, 2001. – 56 с. – EDN YOLGSO.

10. Отходы нефтегазового комплекса в дорожном строительстве / Г.Г. Ягафарова, А.Х. Сафаров, А.В. Московец, Л.П. Акчурина, Ю.А. Федорова, Д.Х. Акчурина // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – 2014. – № 8. – С. 9–11. – EDN SJMXVV.

11. Тимрот С.Д., Гурылёва Н.Л., Яманина Н.С. Использование нефтесодержащих отходов в производстве керамзита // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2010. – Т. 53, № 5. – С. 117–118. – EDN OWYJTV.

12. Яковлев С.И. Создание экотехнопарка по безотходной утилизации нефтесодержащих отходов с получением технического грунта и котельных (печных) топлив // *Экологический вестник России*. – 2020. – № 4. – С. 18–20. – EDN IKWCNK.

13. Ефимова С.Б., Калинина Е.В. Оценка возможности использования остатков после пиролиза нефтесодержащих отходов в производстве керамических изделий // *Химия. Экология. Урбанистика*. – 2020. – Т. 1. – С. 83–87. – EDN BXEEKW.

14. Цокур О.С. Повышение ресурсосбережения утилизацией нефтесодержащих отходов реагентным способом с получением экологически безопасных продуктов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 03.02.08. – Краснодар, 2015. – 22 с. – EDN ZPOYPL.

15. Ратнер С.В. Практические приложения анализа среды функционирования (Data Envelopment Analysis) к решению задач экологического менеджмента. – М.: Инфра-М, 2020. – 231 с. – (Научная мысль). – ISBN 978-5-16-015288-2. – EDN JWZFUL.

16. Simulation and multi-objective evaluation of reuse potential of waste recycling system for oil and gas industry / M. Derevyanov, Y. Pleshivtseva, A. Afinogentov, A. Mandra, A. Pimenov // *2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. – Samara, 2019. – P. 429–434. – DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976783. – EDN ONLVML.

17. Деревянов М.Ю., Пleshивцева Ю.Э. Анализ ресурсной ценности и ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе DEA-метода // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2022. – № 4 (216). – С. 27–34. – DOI: 10.17213/1560-3644-2022-4-27-34. – EDN QJNFRG.

18. Dellnitz A, Rödder W. Returns to scale as an established scaling indicator: always a good advisor? // *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik*. – 2021. – Vol. 241 (2). – P. 173–186. – DOI: 10.1515/jbnst-2019-0058.

19. Examination on level of scale efficiency in public hospitals in Tanzania / F. Fumbwe, R. Lihawa, F. Andrew, G. Kinyanjui, E. Mkuna // *Cost Effectiveness and Resource Allocation*. – 2021. – Vol. 19. – Art. 49. – DOI: 10.1186/s12962-021-00305-4.

20. Оценка ресурсного потенциала тяжелых нефтяных остатков на основе DEA-метода / П.М. Тюкилина, П.Е. Красников, М.Ю. Деревянов, А.А. Пименов, Ю.Э. Пleshивцева // *Нефтехимия*. – 2019. – Т. 59, № 6. – С. 652–658. – DOI: 10.1134/S0028242119060145. – EDN OUBWQL.

21. Effect of scale on water users' associations' performance in Tunisia: nonparametric model for scale elasticity calculation / A. Frija, J. Buysse, S. Speelman, A. Chebil, G. Van Huylenbroeck // *2010 AAAE Third Conference/AEASA 48th Conference, September 19–23, 2010*. – Cape Town, South Africa, 2010. – DOI: 10.22004/ag.econ.95982. – URL: <https://ideas.repec.org/p/ags/aaae10/95982.html> (accessed: 29.08.2023).

22. Плешивцева Ю.Э., Казаринов А.В., Деревянов М.Ю. Многофакторный анализ процессов производства дорожных битумов путем окисления продуктов нефтепереработки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – Т. 29, № 3 (71). – С. 52–66. – DOI: 10.14498/tech.2021.3.3. – EDN QYHQKK.

23. Using DEA models to measure the efficiency of energy saving projects / M.Y. Derevyanov, Y.E. Pleshivtseva, L.S. Kordyukova, A.V. Rapoport // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 552. – P. 012020. – DOI: 10.1088/1757-899X/552/1/012020.

24. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision-making units // European Journal of Operation Research. – 1978. – Vol. 6 (2). – P. 429–444.

25. Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis // Management Science. – 1984. – Vol. 30 (9). – P. 1078–1092.

26. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Super-efficiency models // Data envelopment analysis. – New York: Springer, 2007. – DOI: 10.1007/978-0-387-45283-8_10.

27. Сравнительная оценка ресурсной ценности объектов хранения нефтесодержащих отходов на основе DEA-метода / Ю.Э. Плешивцева, М.Ю. Деревянов, Д.В. Каширских, А.А. Пименов, А.В. Керов, В.К. Тянь // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 139–144. – DOI: 10.24887/0028-2448-2018-11-139-144. – EDN YPXNTN.

28. Лисситса А., Бабичева Т. Анализ оболочки данных (DEA) – современная методика определения эффективности производства // Discussion Paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. – 2003. – N 50. – URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-23263> (accessed: 29.08.2023).

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669216 Российская Федерация. Многокритериальная оптимизация комплексной переработки нефтесодержащих отходов по системным критериям качества: № 2022669013: заявл. 18.10.2022; опубл. 18.10.2022 / Ю.Э. Плешивцева, А.А. Афиногентов, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра, А.А. Пименов; заявитель Самарский государственный технический университет. – EDN NXBOFR.

30. MaxDEA 8 Basic: Free DEA software. – URL: <http://maxdea.com/MaxDEA.htm> (accessed: 29.08.2023).

31. Глинский В.В., Ионин В.Г. Статистический анализ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Филинь, 1998. – 264 с. – ISBN 5-89568-089-5. – EDN RBDWUL.

Деревянов Максим Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». Основное направление исследований – системный анализ, управление, обработка информации и автоматизация технологических процессов и производств. Имеет более 60 печатных работ. E-mail: mder2007@mail.ru.

Derevyanov Maksim Y., PhD (Eng.), associate professor at the Control and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes Department in the Samara State Technical University. The main field of his scientific research is system analysis, management, information processing and automation of technological processes and productions. Has more than 60 printed works. E-mail: mder2007@mail.ru.

Analysis of scaling indicators when assessing the resource potential of objects of the oil-contaminated waste recycling system based on the DEA method *

M.YU. DEREVYANOV

Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation

mder2007@mail.ru

Abstract

The paper proposes a new approach to assessing the resource potential of the objects of the oil-contaminated waste (OCW) recycling system based on the Data Envelopment Analysis (DEA) method, taking into account the constant and variable economies of scale, and a comparative analysis of the scaling indicators used in selecting the best facilities of the OCW recycling system in making informed managerial decisions. A four-stage calculation algorithm has been developed, in which the first stage determines estimates of the resource value of OCW in storage facilities. At the second and third stages, estimates of the resource potential of combinations of "OCW storage - recycling technology" are calculated taking into account constant and variable economies of scale, respectively, as well as the effect of scale (constant, increasing or decreasing), which characterizes the qualitative assessment of the scale properties of objects of the OCW recycling system. At the fourth stage, an assessment of the effectiveness of scaling, which characterizes the magnitude of the impact of scale of technological operations on the efficiency of OCW recycling in the analyzed system, and the optimal sequence of processing of OCW in storages by the criterion of increasing the resource potential of the system objects, taking into account indicators of scaling, is determined.

By the example of the system of OCW recycling in the Samara region estimates of resource value of OCW in storages, assessment of resource potential of combinations "OCW storage – recycling technology" and corresponding indicators of scaling (effect of scale and evaluation of scaling efficiency) have been calculated. The comparison of two optimal sequences by the criterion of increasing the resource potential of the system objects, taking into account constant and variable economies of scale was made, and it is shown how the indicators of scaling can influence the adoption of sound management decisions.

Keywords: oil-contaminated waste, recycling system, technology, resource potential, resource value, scale effect, scaling efficiency, Data Envelopment Analysis

REFERENCES

1. *Okruzhayushchaya sreda. Otkhody proizvodstva i potrebleniya* [Production and consumption waste, environment]. *Federal State Statistics Service of the Russian Federation*. Website. (In Russian). Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (accessed 29.08.2023).
2. SP 2.1.7.1386-03. *Sanitarnye pravila po opredeleniyu klassa opasnosti toksichnykh otkhodov proizvodstva i potrebleniya* [Sanitary rules for determining the hazard class of toxic waste of production and consumption].
3. Krapivskii E.I. *Nefteshlamy: unichtozhenie, utilizatsiya, dezaktivatsiya* [Oil sludge: destruction, recycling, decontamination]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2021. 432 p.

* Received 26 June 2023.

4. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu* [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021]. State report. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia Publ., Lomonosov Moscow State University Publ., 2022. 684 p.

5. GOST R 56828.43–2018. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Utilizatsiya i obezvezhivanie neftesoderzhashchikh otkhodov. Pokazateli dlya identifikatsii* [State Standard R 56828.43–2018. Best available techniques. Recycling and disposal of oily waste. Indicators to identify]. Moscow, Standartin-form Publ., 2018.

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. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

7. Jerez S., Ventura M., Molina R., Pariente M.I., Martínez F., Melero J.A. Comprehensive characterization of an oily sludge from a petrol refinery: A step forward for its valorization within the circular economy strategy. *Journal of Environmental Management*, 2021, Vol. 285, p. 112124. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112124.

8. Jagaba A.H., Kutty S.R.M., Lawal I.M., Birniwa A.H., Affan A.C., Yaro N.S.A., Usman A.K., Umaru I., Abubakar S., Noor A., Soja U.B., Yakubu A.S. Circular economy potential and contributions of petroleum industry sludge utilization to environmental sustainability through engineered processes – A review. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2022, vol. 3, p. 100029. DOI: 10.1016/j.clcb.2022.100029.

9. Mazlova E.A., Meshcheryakov S.V. *Problemy utilizatsii nefteshlamov i sposoby ikh pererabotki* [Problems of oil sludge disposal and methods of their processing]. Moscow, Noosfera Publ., 2001. 56 p.

10. Yagafarova G.G., Safarov A.Kh., Moskovets A.V., Akchurina L.R., Fedorova Yu.A., Akchurina D.Kh. Otkhody neftegazovogo kompleksa v dorozhnom stroitel'stve [Waste oil and gas complex in road construction]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse = Environmental Protection in Oil and Gas Complex*, 2014, no. 8, pp. 9–11.

11. Timrot S.D., Guryleva N.L., Yamanina N.S. Ispol'zovanie neftesoderzhashchikh otkhodov v proizvodstve keramzita [The use of oil-containing waste in the production of expanded clay]. *zvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*, 2010, vol. 53, no. 5, pp. 117–118.

12. Yakovlev S.I. Sozdanie ekotekhnoparka po bezotkhodnoi utilizatsii neftesoderzhashchikh otkhodov s polucheniem tekhnicheskogo grunta i kotel'nykh (pechnykh) topliv [Creation of ecotechnopark for non-waste disposal of oily waste with obtaining technical soil and boiler (furnace) fuels]. *Ekologicheskii vestnik Rossii = Environmental bulletin of Russia*, 2020, no. 4, pp. 18–20.

13. Efimova S.B., Kalinina E.V. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya ostatkov posle piroliza neftesoderzhashchikh otkhodov v proizvodstve keramicheskikh izdelii [Evaluation of the use of residues after pyrolysis of oily waste in the production of ceramic products]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika = Chemistry. Ecology. Urbanistics*, 2020, vol. 1, pp. 83–87.

14. Tsokur O.S. *Povyshenie resursoberezheniya utilizatsiei neftesoderzhashchikh otkhodov reagentnym sposobom s polucheniem ekologicheskii bezopasnykh produktov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Increase of resource saving by recycling oily waste by reagent method with obtaining environmentally safe products. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Krasnodar, 2015. 22 p.

15. Ratner S.V. *Prakticheskie prilozheniya analiza sredy funktsionirovaniya (Data Envelopment Analysis) k resheniyu zadach ekologicheskogo menedzhmenta* [Practical applications of Data Envelopment Analysis to environmental management problems]. Moscow, Infra-M Publ., 2020. 231 p. ISBN 978-5-16-015288-2.

16. 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, 2019, pp. 429–434. DOI 10.1109/CSCMP45713.2019.8976783.

17. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E. Analiz resursnoi tsemnosti i resursnogo potentsiala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchikh otkhodov na osnove DEA-metoda [Analysis of the resource value and resource potential of the objects of the system of oil-contaminated waste processing based on DEA-method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhni-*

cheskie nauki = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series, 2022, no. 4 (216), pp. 27–34. DOI: 10.17213/1560-3644-2022-4-27-34.

18. Dellnitz A, Rödder W. Returns to scale as an established scaling indicator: always a good advisor? *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik*, 2021, vol. 241 (2), pp. 173–186. DOI: 10.1515/jbnst-2019-0058.

19. Fumbwe F., Lihawa R., Andrew F., Kinyanjui G., Mkuna E. Examination on level of scale efficiency in public hospitals in Tanzania. *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, 2021, vol. 19, art. 49. DOI: 10.1186/s12962-021-00305-4.

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. DOI: 10.1134/S0965544119110148. Translated from *Neftekhimiya*, 2019, vol. 59, no. 6, pp. 652–658. DOI: 10.1134/S0028242119060145.

21. Frija A., Buysse J., Speelman S., Chebil A., Van Huylbroeck G. Effect of scale on water users' associations' performance in Tunisia: nonparametric model for scale elasticity calculation. *2010 AAEA Third Conference/AEASA 48th Conference*, September 19–23, 2010, – Cape Town, South Africa, 2010. DOI: 10.22004/ag.econ.95982.

22. Pleshivtseva Yu.E., Kazarinov A.V., Derevyanov M.Yu. Mnogofaktorny analiz protsessov proizvodstva dorozhnykh bitumov putem okisleniya produktov neftepererabotki [Multivariate analysis of road bitumen production processes by oxidation of oil products]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2021, vol. 29, no. 3 (71), pp. 52–66. DOI: 10.14498/tech.2021.3.3.

23. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Kordyukova L.S., Rapoport A.V. Using DEA models to measure the efficiency of energy saving projects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 552, p. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/552/1/012020.

24. 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.

25. Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 1984, vol. 30 (9), pp. 1078–1092.

26. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Super-efficiency models. *Data envelopment analysis*. New York, Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-0-387-45283-8_10.

27. Pleshivtseva Yu.E., Derevyanov M.Yu., Kashirskikh D.V., Pimenov A.A., Kerov A.V., Tyan V.K. Sravnitel'naya otsenka resursnoi tsennosti ob"ektov khraneniya neftesoderzhashchikh otkhodov na osnove DEA-metoda [Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method]. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*, 2018, no. 11, pp. 139–144. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-11-139-144.

28. Lissitsa A., Babićeva T. The Data Envelopment Analysis (DEA) for determining the efficiency of a production. *Discussion Paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe*, 2003, no. 50. (In Russian). Available at: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-23263> (accessed 29.08.2023).

29. Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A., Derevyanov M.Yu., Mandra A.G., Pimenov A.A. *Mnogokriterial'naya optimizatsiya kompleksnoi pererabotki neftesoderzhashchikh otkhodov po sistemnym kriteriyam kachestva* [Multi-criteria optimization of the complex processing of oily waste according to system quality criteria]. The Certificate on official registration of the computer program RF. No. 2022669216, 2022.

30. *MaxDEA 8 Basic: Free DEA software*. Available at: <http://maxdea.com/MaxDEA.htm> (accessed 29.08.2023).

31. Glinskiy V.V., Ionin V.G. *Statisticheskii analiz* [Statistical analysis]. 2nd ed., rev. Moscow, Filin Publ., 1998. 264 p. ISBN 5-89568-089-5.

Для цитирования:

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. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-47-68.

For citation:

Derevyanov M.Yu. Analiz pokazatelei masshtabirovaniya pri otsenke resursnogo potentsiala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchikh otkhodov na osnove metoda DEA [Analysis of scaling indicators when assessing the resource potential of objects of the oil-contaminated waste recycling system based on the DEA method]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 47–68. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-47-68.