

## ЭНТРОПИЙНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ПРОЦЕДУРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.С. Птускин

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,  
г. Москва, Российская Федерация

Экологическое нормирование деятельности производственных предприятий является одним из основных механизмов решения задачи предотвращения и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Современные принципы этого механизма основаны на концепции наилучших доступных технологий (НДТ). Ключевым остается вопрос выбора НДТ, при его решении необходимо учитывать многочисленные критерии, по которым ни одна из конкурирующих технологий не имеет явных предпочтений. Это определяет актуальность задачи разработки новых эколого-экономико-математических моделей и методов оценки альтернативных вариантов и идентификации НДТ. Рассматривается проблема, связанная с реализацией одного из основных этапов определения НДТ – анализа и обобщения большого количества получаемой из различных источников информации по входным и выходным потокам альтернативных технологий (выбросам, сбросам, отходам, потребляемому сырью, энергии). Качество информации имеет ключевое значение, однако определить объективные данные о характеристиках и потенциальных комплексных воздействиях технологий достаточно сложно. Лица, принимающие решения, должны критически относиться к качеству данных и сравнивать данные из различных источников с использованием количественных методов оценки неопределенности, однако в настоящее время определение уровней потоков в основном зависит от экспертных оценок. Информация, полученная из различных источников, может быть нестабильной на начальных этапах использования технологии. Необходимо определить когда значения потоков, соответствующих периоду времени, когда альтернативные технологии были достаточно проверены, т. е. когда значения потоков становятся стабильными и их можно использовать для процедуры сравнения и выбора НДТ. Традиционный вероятностный подход к анализу и обработке больших объемов данных в этом случае неприменим, поскольку законы распределения случайных данных неизвестны. Для сравнения данных из различных источников предлагается количественный метод оценки, анализа и обработки информации, основанный на измерении информационной энтропии. Результатом его применения является определение устойчивых значений полученных из различных источников данных о воздействиях технологии на окружающую среду, которые можно обоснованно применять в процессе оценки экологической результативности технологий. Процедура определения стабильных значений входных и выходных потоков альтернативных технологий поясняется на иллюстрационном примере. Показано, как использовать полученную информацию для решения задачи многокритериального выбора НДТ в случае традиционного подхода представления параметров задачи, оперирующего обычными числовыми значениями, и в случае представления параметров размытыми величинами в терминах теории нечетких множеств.

**Ключевые слова:** экология, наилучшие доступные технологии, информационная энтропия, экономико-математические методы

**Ссылка при цитировании:** Птускин А.С. Энтропийный метод анализа данных для процедуры определения наилучших доступных технологий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2018. Т. 11, № 3. С. 203–212. DOI: 10.18721/JE.11318

## THE ENTROPY METHOD OF DATA ANALYSIS FOR THE PROCEDURE OF DETERMINING THE BEST AVAILABLE TECHNOLOGIES

A.S. Ptuskin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Environmental regulation of the activities of manufacturing enterprises is one of the main mechanisms for solving of the problem of preventing and reducing the negative impact on the environment. The modern principles of this mechanism are based on the

concept of the best available techniques (BAT). The choice of BAT remains the key issue, and solving it should take into account numerous criteria by which none of the competing technologies has obvious preferences. This adds relevance to the task of developing new ecological-economic-mathematical models and methods for evaluating alternative options and identifying BAT. We have considered the problem of implementing one of the main stages in determining BAT: analysis and generalization of a large number of information obtained from different sources on input and output flows of alternative technologies (emissions, discharges, wastes, raw materials, energy consumed). The quality of the information has key importance, but it is rather difficult to determine objective data on the characteristics and potential complex impacts of technologies. Decision makers have to be critical about the data quality and compare data from various sources using quantitative methods of uncertainty estimation, but nowadays determining flow levels mostly depends on expert assessment. Information received from various sources can be unstable at the initial stages of using the technology. It is necessary to determine the values of the flows corresponding to the time period when the alternative technologies have been sufficiently tested, that is, the flow values become stable and can be used for the BAT comparison and selection procedure. The traditional probabilistic approach to analysis and processing of large amounts of data is not applicable in this case, since the laws of distribution of random data are unknown. A quantitative method for estimating, analyzing and processing information based on the information entropy measurement is proposed to compare the data from various sources. The result of its application is the determination of sustainable values, obtained from various data sources about the environmental impacts of technology, which can be reasonably applied in the process of assessment of environmental effectiveness of technologies. The procedure of determination of stable values of the input and output flows of alternative technologies is explained in the illustrative example. We have demonstrated ways of using the obtained information for solving the task of multi-criterial choice of BAT in the case of the traditional approach to representing the parameters of the task, which operates with ordinary numerical values, and in the case of the representation of parameters by diffuse quantities in terms of fuzzy set theory.

**Keywords:** ecology, best available technologies, information entropy, economics and mathematical methods

**Citation:** A.S. Ptuskin, The entropy method of data analysis for the procedure of determining the best available technologies, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 11 (3) (2018) 203–212. DOI: 10.18721/JE.11318

*Введение.* С увеличением техногенной нагрузки на природные системы актуальность экологических проблем возрастает. Основным источником негативных воздействий на окружающую среду — производственные предприятия, поэтому исключительно важно применение рациональных методов регулирования их деятельности, стимулирующих внедрение экологически чистых, ресурсосберегающих и безотходных технологий и производств, оснащение предприятий природоохранным оборудованием. Переход на современные ресурсосберегающие, экологически безопасные технологии является одним из главных условий устойчивого развития инновационной экономики [1].

Современные принципы экологического нормирования и регулирования деятельности предприятий основаны на концепции наилучших доступных технологий (НДТ). Этот термин определяется в Директиве ЕС о ком-

плексном предупреждении и контроле загрязнения<sup>1</sup> как наиболее эффективные новейшие разработки для различных видов деятельности, процессов и способов функционирования, свидетельствующие о практической целесообразности конкретных технологий в качестве основы для установления разрешений на выбросы и сбросы загрязняющих веществ и размещение отходов для предотвращения или минимизации загрязнения окружающей среды. Целью использования концепции является переход к нормированию и минимизации комплексного негативного воздействия на окружающую среду с учетом уровней, соответствующих НДТ. Эти технологии рассматривают и в контексте стимулирования инноваций, например, в [2]

<sup>1</sup> Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 // Concerning Integrated Pollution Prevention and Control: [Official Journal of the European Union 2008. L 24/8].



подчеркивается, что они могут стать элементом национальной инновационной системы.

Во многих ситуациях сложно определить альтернативную технологию, которая обеспечивает наиболее высокий уровень охраны окружающей среды. Вопрос выбора НДТ и соответствующих им технологических показателей оказывается ключевым при реализации концепции НДТ [3]. С конца 90-х гг. разрабатывались различные методы определения НДТ на прикладном уровне [4, 5], общая методология выбора представлена в справочном документе «Экономические аспекты и вопросы воздействия на различные компоненты окружающей среды» (BREF Economics and Cross-media Effects)<sup>2</sup>, однако формального инструмента для анализа данных и поддержки принятия решения не существует, и это инициирует разработку новых средств [6]. Выбор НДТ усложняется необходимостью учета многочисленных критериев, по которым ни одна из конкурирующих технологий не имеет явных предпочтений с позиций обеспечения самого высокого уровня охраны окружающей среды. Критической остается проблема несовершенной информации при принятии решений и идентификации соответствующих экологических, технологических и экономических показателей. Ввиду сложности, многокритериальности и многоаспектности задачи для нее справедливо утверждение о необходимости расширения арсенала инструментально-математических средств моделирования как одного из основных направлений повышения качества экономико-математических моделей и их эффективности [7]. Проблема совершенствования методов выбора НДТ остается актуальной [8], а применение эколого-экономико-математических моделей дает объективную основу для ее решения.

Цель данного исследования состоит в обосновании количественного метода оценки, анализа и обработки информации, позволяющего определить устойчивые, стабильные значения входных и выходных потоков по альтернативным технологиям, которые можно использовать для идентификации НДТ. В большинстве случаев эту информацию нельзя счи-

тать совершенной, необходимо проводить сравнение данных из различных источников и критически относиться к их качеству.

#### *Методика исследования.*

**Задача анализа данных по входным и выходным потокам альтернативных технологий.** В соответствии с общей методологией определения НДТ одним из основных этапов является анализ и обобщение данных для альтернативных технологий по входным и выходным потокам: выбросам, сбросам, отходам, потребляемому сырью, энергии. Для объективной оценки альтернатив необходимо получить и провести анализ большого количества разнообразной информации [9], источником которой могут быть данные мониторинга на существующих производствах, отчетные материалы, экспериментальные данные, расчетные данные, данные производителей оборудования. Качество данных имеет ключевое значение, они должны быть получены из достоверных источников и быть достаточно точными для сравнения воздействий альтернативных вариантов технологий на различные компоненты окружающей среды.

Однако определить такие данные о характеристиках и потенциальных комплексных воздействиях технологий достаточно сложно, и это является серьезной проблемой при реализации концепции НДТ [8]. Основным источником информации являются экологические информационные системы промышленных предприятий, предоставляющие данные экологической отчетности за предыдущие периоды по применяемым технологиям, оборудованию, сбросам и выбросам, загрязняющим веществам, образованию отходов, иным факторам воздействия на окружающую среду и экономическим показателям. Успешная апробация на промышленном уровне относится к необходимым условиям отнесения технологии к НДТ, однако менее надежные данные не должны исключаться из процесса оценки, так как это может быть препятствием внедрению инновационных технологий, для которых объективно имеется меньше информации, чем для уже используемых технологий. На сегодняшний день количественные методы определения уровней выбросов практически не описаны в литературе, их определение в значительной

<sup>2</sup> BREF Economics and Cross-media Effects. URL: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/ecm.html>, 2006.

степени зависит от экспертных оценок [10].

Общая методология выбора НДТ определяет, что лица, принимающие решения, должны критически относиться к качеству данных и сравнивать данные из различных источников с использованием количественных методов оценки неопределенности [11]. В [12] рассматривается проблема пропусков при сборе крупномасштабных данных. В [13] представлен метод получения значений промышленной эмиссии, основанный на статистических инструментах, определение размера выборки для этапа сбора данных основывается на концепции доверительного интервала. Нами предлагается метод оценки, анализа и обработки информации, основанный на измерении информационной энтропии.

Информационная, или Шенноновская, энтропия измеряет уровень неопределенности состояния некоторой системы [14]. Для группы событий  $E = \{e_1, \dots, e_n\}$  с априорными вероятностями возникновения событий  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ ,  $p_i \geq 0$ , такими, что  $p_1 + \dots + p_n = 1$ , функция энтропии определяется как:

$$H = -\sum_i p_i \log p_i,$$

Уменьшение энтропии свидетельствует об уменьшении неопределенности, т. е. об увеличении знаний о состоянии системы, увеличение энтропии свидетельствует об уменьшении этих знаний. Энтропийные модели сложных систем и их различные приложения при анализе и управлении производственными, социальными и бизнес-процессами рассмотрены, например, в [15–17] и др. Мы используем энтропию в качестве показателя уровня знаний о величинах входных и выходных потоках анализируемых технологий.

Данные по входным и выходным потокам представляют собой последовательности измерений через равные промежутки времени – статистические материалы о значениях потоков, т. е. временные ряды с указанием для каждого периода номера измерения и самого измерения. Информация, полученная из различных источников, может быть нестабильной на начальных этапах использования технологии. Необходимо определить значения потоков, соответствующих периоду времени,

когда альтернативные технологии были достаточно проверены, т. е. значения потока становятся устойчивыми, стабильными для каждой альтернативной технологии, и их можно использовать для процедуры сравнения и выбора НДТ. Традиционный вероятностный подход к анализу и обработке больших объемов данных в этом случае неприменим, поскольку законы распределения случайных данных неизвестны.

**Метод определения устойчивых значений входных и выходных потоков альтернативных технологий.** По каждой альтернативной технологии информация по входным и выходным потокам поступает из нескольких источников через определенные промежутки времени. Схематично это представлено на рис. 1.

На схеме используются следующие обозначения:

$N$  – количество альтернативных технологий;

$n$  – индекс технологии,  $n = 1, \dots, N$ ;

$L^n$  – количество источников информации по технологии  $n$ ;

$l$  – индекс источника информации,  $l = 1, \dots, L^n$ ;

$T$  – количество периодов времени, в течение которых поступает информация от источников;

$t$  – индекс периода времени, в который поступает информация от источников,  $t = 1, \dots, T$ ;

$I$  – количество входных и выходных потоков (характеристик) технологии;

$i$  – номер потока (характеристики),  $i = 1, \dots, I$ ;

$a_{lt}^{ni}$  – значение  $i$ -й характеристики (величины потока) технологии  $n$ , полученной из  $l$ -го источника в период времени  $t$ ,  $i = 1, \dots, I$ ,  $l = 1, \dots, L^n$ ,  $t = 1, \dots, T$ .

Для технологии  $n$  и характеристики  $i$  имеем набор данных, представленный в табл. 1.

Определим минимальное и максимальное значения для полученного набора характеристик:

$$a_{t \max}^{ni} = \max \{a_{lt}^{ni} \mid l = 1, \dots, L^n \mid t = 1, \dots, T\};$$

$$a_{t \min}^{ni} = \min \{a_{lt}^{ni} \mid l = 1, \dots, L^n \mid t = 1, \dots, T\}.$$

Весь диапазон полученных значений  $[a_{t \max}^{ni}; a_{t \min}^{ni}]$  разобьем на  $F$  равных интервалов.

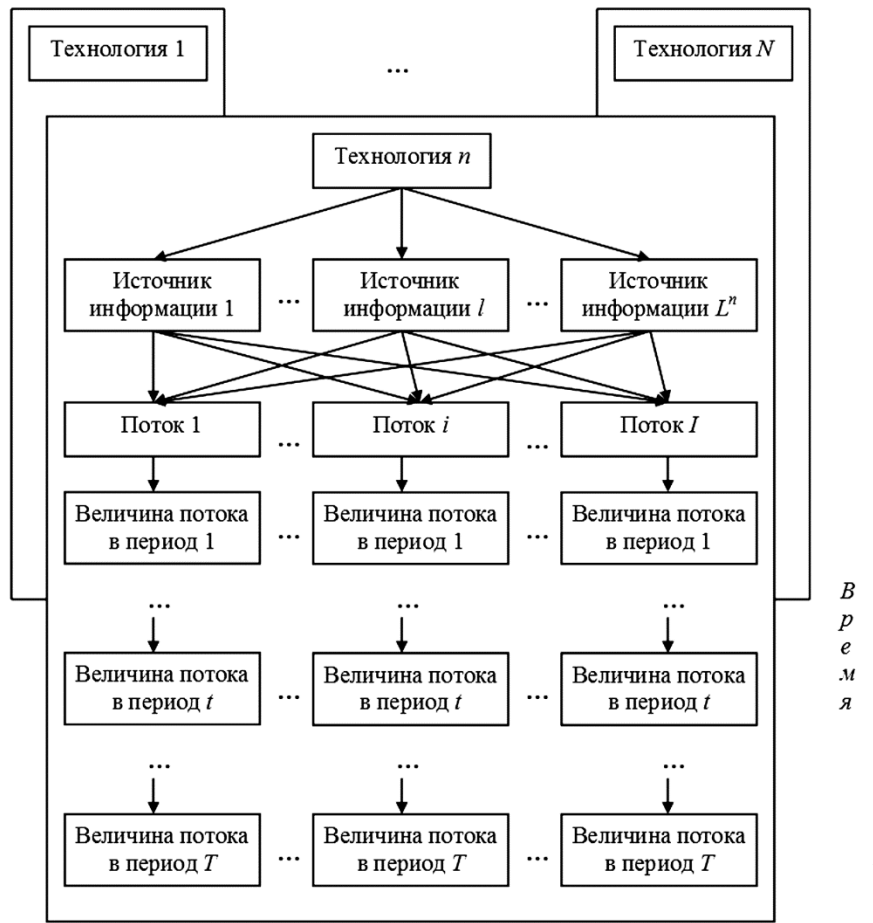


Рис. 1. Схема поступления данных по входным и выходным потокам

Fig. 1. The scheme of data receipt on input and output streams

Таблица 1

Данные по инвентаризации входных и выходных потоков

Data on the inventory of input and output flows

Источник \ Период	1	...	l	...	L <sup>n</sup>
1	a <sup>ni</sup> <sub>11</sub>	...	a <sup>ni</sup> <sub>l1</sub>	...	a <sup>ni</sup> <sub>L<sup>n</sup>1</sub>
...	...	...	...	...	...
t	a <sup>ni</sup> <sub>1t</sub>	...	a <sup>ni</sup> <sub>lt</sub>	...	a <sup>ni</sup> <sub>L<sup>n</sup>t</sub>
...	...	...	...	...	...
T	a <sup>ni</sup> <sub>1T</sub>	...	a <sup>ni</sup> <sub>lT</sub>	...	a <sup>ni</sup> <sub>L<sup>n</sup>T</sub>

Для каждого интервала определим количество случаев c<sup>ni</sup><sub>f</sub>, когда значение a<sup>ni</sup><sub>it</sub>, i = 1, ..., I, f = 1, ..., F, L = 1, ..., L<sup>n</sup>, t = 1, ..., T, попадает в границы f-го интервала.

Общее число значений {a<sup>ni</sup><sub>it</sub>} в наборе данных равно K = L<sup>n</sup> Ч T.

Относительная частота случаев, когда значение i-й характеристики принадлежит f-му интервалу, принимается нами как оценка соответствующей вероятности события, состоящего в том, что значение i-й характеристики попадает в f-й интервал за T периодов времени:

$$p^{ni}_f = c^{ni}_f / K = c^{ni}_f / (L^n \cdot T).$$

Энтропия набора данных i-й характеристики технологии n за T периодов времени определяется следующим образом:

$$H^{ni}_T = - \sum_f p^{ni}_f \log p^{ni}_f.$$

После получения данных следующего периода времени T+1 величина энтропии примет значение H<sup>ni</sup><sub>T+1</sub>.

Если на протяжении  $h$  периодов величина энтропии меняется несущественно:

$$|H_{T+1}^{ni} - H_T^{ni}| < \varepsilon$$

(значения  $h$  и  $\varepsilon$  определяются экспертно), это свидетельствует о стабильности потока данных, значения которых могут надежно использоваться для процедуры выбора НДТ.

Если изменения энтропии значительны, технологию нельзя рассматривать в качестве НДТ.

Приведем пример, иллюстрирующий представленную схему на примере одной из альтернативных технологий производства извести для определения выбросов в атмосферный воздух неорганической пыли, содержащей диоксид кремния. Пусть технология имеет номер  $n$ , а поток номер  $i$ . Анализируются данные, поступающие из  $L^n = 5$  источников. Приняты следующие значения экспертных параметров:  $h = 3$ ,  $\varepsilon = 0,01$ . Показатели выбросов загрязняющего вещества в атмосферный воздух представлены в табл. 2. Изменение энтропии по периодам показано на рис. 2. Характеристики, полученные в период 8 (и позднее), можно считать стабильными.

В итоге получаем интервал устойчивых значений параметра [103,3; 106,9], который может быть использован для процедуры сравнения и выбора НДТ.

Таблица 2

**Выбросы неорганической пыли, содержащей диоксид кремния, в атмосферный воздух**

**Emissions of inorganic dust containing silicon dioxide into the atmospheric air**

Источник ( $l$ ) \ Период ( $t$ )	1	2	3	4	5
	Выбросы, мг/м <sup>3</sup> ( $a_{lt}^{ni}$ )				
1	118,3	128,8	106,4	95,0	85,1
2	103,9	83,6	105,6	116,4	117,9
3	93,6	112,5	116,2	97,5	114,6
4	91,2	89,0	101,1	106,4	106,9
5	109,2	119,3	99,6	109,5	97,0
6	96,6	103,8	111,0	94,1	104,6
7	112,2	102,4	105,7	100,6	108,0
8	112,1	107,0	112,0	111,2	105,2
9	106,6	108,6	103,4	103,3	100,6
10	103,3	106,2	106,5	105,6	106,9

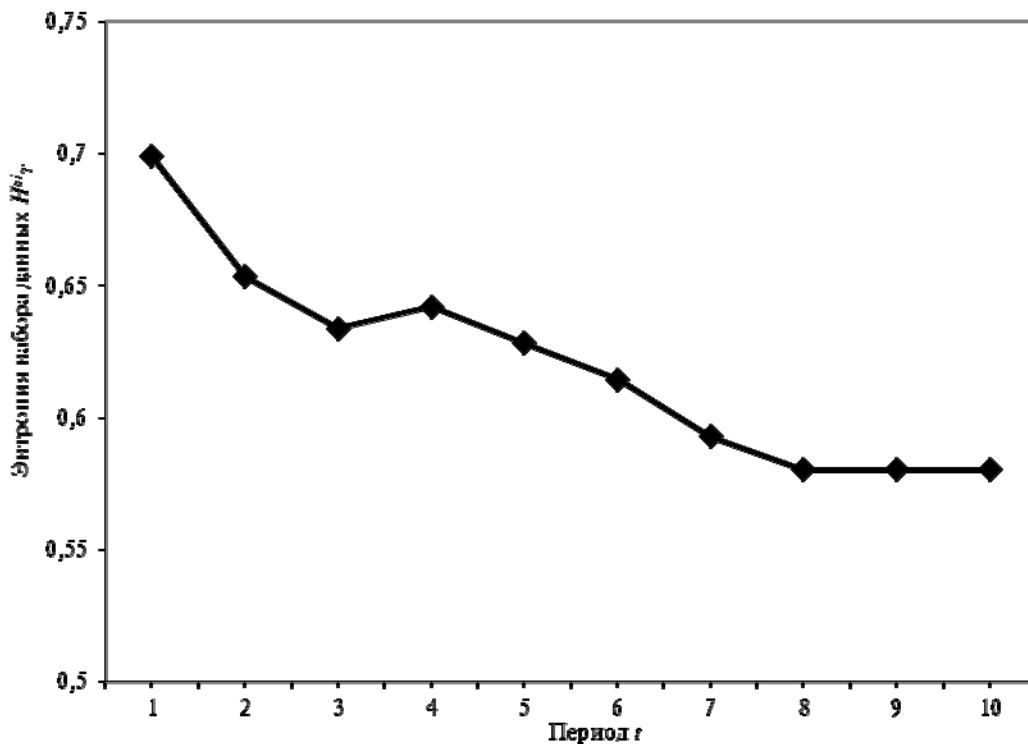


Рис. 2. Изменение энтропии набора данных

Fig. 2. Change of the data set entropy

**Использование данных по входным и выходным потокам альтернативных технологий для решения задачи многокритериального выбора НДТ.** Для оценки НДТ используются различные методологические подходы [6]. К особенностям решения экологических проблем относятся необходимость соблюдения компромиссов между различными экологическими, экономическими, социально-политическими критериями, конфликты представлений, интересов и оценок, поэтому формальная методология многокритериального принятия решений в этом случае особенно эффективна [18].

Проблема многокритериального принятия решений по выбору наилучшей из  $N$  альтернативных технологий, оцениваемых по  $I$  входным и выходным потокам, может быть представлена матрицей

	$C_1$	$C_2$	...	$C_I$
$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1I}$
$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2I}$
...	...	...	...	...
$A_N$	$x_{N1}$	$x_{N2}$	...	$x_{NI}$
$W$	$w_1$	$w_2$	...	$w_I$

где  $A_1, A_2, \dots, A_N$  – набор возможных альтернативных технологий, из которых необходимо выбрать наилучшую;  $C_1, C_2, \dots, C_I$  – характеристики (входные и выходные потоки) технологии, по которым оценивается каждая альтернатива;  $x_{ni}$  – оценка альтернативной технологии  $A_n$  по характеристике  $C_i$ ;  $n = 1, \dots, N$ ;  $i = 1, \dots, I$ ;  $w_i$  – вес характеристики  $C_i$ ,  $i = 1, \dots, I$ .

Используемые критерии, источники информации, математические методы, которые применяются на различных стадиях процесса определения НДТ, представлены в обзоре [19]. Наиболее часто применяются метод анализа иерархий АНР, метод многокритериальной теории полезности MAUT, метод TOPSIS, метод взвешенной суммы критериев Weighted Sum Method, метод ELECTRE, метод PROMETHEE. Реализацию этих методов с точки зрения представления параметров задачи можно разделить на два на-

правления. Первый традиционный подход оперирует с обычными числовыми значениями. Второй подход представляет параметры размытыми величинами в терминах теории нечетких множеств.

В случае представления обычными числами для определения величины критерия  $x_{ni}$ , характеризующего технологию  $n$  по потоку  $i$ , можно, например, использовать критерий Гурвица:

$$x_{ni} = \lambda x_{ni}^{\max} + (1 - \lambda) x_{ni}^{\min},$$

где  $x_{ni}^{\max} = \max \{d_{ni}^l | l = 1, \dots, L^n\}$ ;  $x_{ni}^{\min} = \min \{d_{ni}^l | l = 1, \dots, L^n\}$ ;  $0 \leq \lambda \leq 1$ .

Так, для данных иллюстрационного примера при  $\lambda = 0,7$  получим значение выбросов неорганической пыли по анализируемой технологии:

$$x_{ni} = 0,7 \cdot 106,9 + (1 - 0,7) 103,3 = 105,8.$$

Таким образом определяются оценки каждого потока для каждой технологии  $x_{ni}$ ,  $n = 1, \dots, N$ ,  $i = 1, \dots, I$ .

В [20] обосновывается продуктивность использования нечеткой логики для многокритериального выбора НДТ. Этот подход использован в ряде статей, обзор которых представлен в [16]. Однако в них методы адекватного представления параметров задачи выбора НДТ нечеткими числами представлены поверхностно. Предложенный энтропийный подход определения устойчивых значений входных и выходных потоков альтернативных технологий позволяет объективно реализовать процедуру фаззификации.

Минимальное и максимальное значения данных последнего периода определяют интервал  $[x_{ni}^{\max}; x_{ni}^{\min}]$  – носитель нечеткого числа  $x_{ni}$ , представляющего рассматриваемую характеристику, а значение  $x_{ni}^{pos}$ , полученное с помощью критерия Гурвица, можно считать наиболее возможным значением показателя. В итоге параметр может быть адекватно представлен нечетким числом с удобной для компьютерной реализации треугольной функцией принадлежности  $(x_{ni}^{\max}; x_{ni}^{pos}; x_{ni}^{\min})$ . Подобная схема фаззификации данных подробно рассматривается в [21]. Метод многокритериального принятия решений с представлением величин входных и выходных потоков нечеткими параметрами предложен, например, в [16].

*Результаты исследования.*

1. Сформулирована задача определения стабильных значений входных и выходных потоков альтернативных технологий для процедуры сравнения и идентификации НДТ.

2. Предложен количественный метод оценки, анализа и обработки полученной из различных источников информации, основанный на измерении информационной энтропии.

3. Показано, каким образом использовать полученные данные для решения задачи многокритериального выбора НДТ в случаях применения методов, оперирующих с обычными числовыми значениями параметров, и методов, представляющих параметры размытыми величинами.

*Выводы.* Анализ данных по входным и выходным потокам альтернативных технологий, поступающих из различных источников, является одним из определяющих этапов задачи выбора НДТ. Представленный метод оценки информации, основанный на измерении информационной энтропии, позволяет определить устойчивые значения данных. Суть метода состоит в том, что по каждой характеристике для каждой технологии подсчитывается энтропия набора данных, которые рассматриваются как временные ряды. Если на протяжении определенного числа периодов времени величина энтропии меняется несущественно, фиксируется стабильность потока данных, и их значения могут использоваться для процедуры выбора НДТ. В противном случае технологию нельзя рассматривать в качестве НДТ.

Иллюстрационный пример подтверждает продуктивность метода. Показано, каким образом использовать полученные данные для решения задачи многокритериального выбора НДТ в случаях представления параметров задачи обычными числовыми значениями и размытыми величинами в терминах теории нечетких множеств.

Полученные результаты могут рассматриваться как расширение арсенала инструментально-математических средств моделирования задач идентификации НДТ.

В продолжение исследования предполагается дальнейшее развитие энтропийного метода для более сложных ситуаций, например, когда анализируемые временные ряды не являются полными, или предприятия, предоставляющие данные, имеют аналогичные характеристики, но различны по производственным уровням, и необходимо использовать процедуры их сопоставления.

*Выражаю благодарность руководителям и участникам секции «Модели и методы разработки стратегии предприятия» Девятнадцатого Всероссийского симпозиума «Стратегическое планирование и развитие предприятий» за критическое и конструктивное обсуждение основных результатов данного исследования.*

Грант Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области, проект № 18-410-400001 «Развитие экономико-математических методов оценки альтернативных вариантов и идентификации наилучших доступных технологий».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Алетдинова А.А., Курчиева Г.И. Формирование условий реализации модели устойчивого развития технологического уклада // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2016. № 4 (246). С. 195–204. DOI: 10.5862/JE.246.17

[2] Бегак М.В., Гусева Т.В. Проблемы проведения экологической реформы в России // Водное хозяйство России. 2015. № 5. С. 70–78.

[3] Гусева Т.В., Молчанова Я.П., Бегак М.В., Миронов А.В. Наилучшие доступные технологии как инструмент промышленной и экологической политики // Вестник Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева: Гуманитарные и социально-экономические исследования. 2015. Т. 2, № 6. С. 62–76.

[4] Leforest V. Assessment of emerging and innovative techniques considering best available technique performances // Resources, Conservation and Recycling. 2014. Vol. 92. P. 11–24.

[5] Evrard D., Villot J., Armiaou C., Gaucher R., Bouhrizi S., Leforest V. Best Available Techniques: An integrated method for multicriteria assessment of reference installations // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 176. P. 1034–1044.

[6] Evrard D., Leforest V., Villot J., Gaucher R. Best Available Technique assessment methods: a literature review from sector to installation level // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 121. P. 72–83.

[7] Клейнер Г.Б. Экономико-математическое моделирование и экономическая теория // Экономика и математические методы. 2001. № 3 (37). С. 111–126.



- [8] **Brüchet T., Tulkens H.** Beyond BAT: Selecting optimal combinations of available techniques, with an example from the limestone industry // *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90. P. 1790–1801.
- [9] **Samarakoon S.M.S.M.K., Gudmestad O.T.** The IPPC Directive and technique qualification at offshore oil and gas installations // *Journal of Cleaner Production*. 2011. Vol. 19. P. 13–20.
- [10] **Polders C., Van den Abeele L., Derden A., Huybrechts D.** Methodology for determining emission levels associated with the best available techniques for industrial waste water // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 29–30. P. 113–121.
- [11] **Mavrotas G., Georgopoulou E., Mirasgedis S., Sarafidis Y., Lalas D., Hontou V., Gakis N.** An integrated approach for the selection of best available techniques (BAT) for the industries in the greater Athens area using multi-objective combinatorial optimization // *Energy Economics*. 2007. Vol. 29 (4). P. 953–973.
- [12] **Stekhoven D.J., Bubhmann P.** MissForest—non-parametric missing value imputation for mixed-type data // *Bioinformatics*. 2012. Vol. 28, no. 1. P. 112–1180.
- [13] **Carretero A.L., de la Rosa J., Sanchez-Rodas D.** Applying statistical tools systematically to determine industrial emission levels associated with the best available techniques // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112, p. 5. P. 4226–4236.
- [14] **Shannon C.E.** A mathematical theory of communication // *Bell system technical journal*. 1948. Vol. 27. P. 379–423.
- [15] **Прангишвили И.В.** Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. М.: Наука, 2003. 428 с.
- [16] **Птускин А.С., Левнер Е., Жукова Ю.М.** Многокритериальная модель определения наилучшей доступной технологии при нечетких исходных данных // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. 2016. № 6 (111). С. 105–127.
- [17] **Птускин А.С., Левнер Е.В.** О выборе направлений модернизации предприятий на основе информационно-энтропийной модели хозяйственного риска // *Экономика и математические методы*. 2014. № 2 (50). С. 111–126.
- [18] **Huang I.B., Keisler J., Linkov I.** Multi-criteria decision analysis in environmental science: ten 2018s of applications and trends // *Science of the Total Environment*. 2011. Vol. 409. P. 3578–3594.
- [19] **Ibáñez-Foriás V., Bovea M.D., Párez-Belis V.** A holistic review of applied methodologies for assessing and selecting the optimal technological alternative from a sustainability perspective // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 70. P. 259–281.
- [20] **Herva M., Roca E.** Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 39. P. 355–371.
- [21] **Levner E., Meyzin L., Ptuskin A.** Periodic Scheduling of a Transporting Robot under Incomplete Input Data: A Fuzzy Approach // *Fuzzy Sets and Systems*. 1998. Vol. 98, no 3. P. 255–266.

**ПТУСКИН Александр Соломонович.** E-mail: aptuskin@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 12.04.2018*

## REFERENCES

- [1] **A.A. Aletdiova, G.I. Kurcheeva,** Establishing the conditions for implementing the model for sustainable development of the technological structure, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 4 (246) (2016) 195–204. DOI: 10.5862/JE.246.17
- [2] **M.V. Begak, T.V. Guseva,** Problems of ecological reforming in Russia, *Water Sector of Russia*, 5 (2015) 70–78.
- [3] **T.V. Guseva, Ya.P. Molchanova, M.V. Begak, A.V. Mironov,** Best available techniques as an instrument of industrial and environmental policy, *Bulletin of D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia: Humanitarian and socio-economic research*, 2 (6) (2015) 62–76.
- [4] **V. Laforest,** Assessment of emerging and innovative techniques considering best available technique performances, *Resources, Conservation and Recycling*, 92 (2014) 11–24.
- [5] **D. Evrard, J. Villot, C. Armiyaou, R. Gaucher, S. Bouhrizi, V. Laforest,** Best Available Techniques: An integrated method for multicriteria assessment of reference installations, *Journal of Cleaner Production*, 176 (2018) 1034–1044.
- [6] **D. Evrard, V. Laforest, J. Villot, R. Gaucher,** Best Available Technique assessment methods: a literature review from sector to installation level, *Journal of Cleaner Production*, 121 (2016) 72–83.
- [7] **G.B. Kleiner,** Economic and mathematical methods and economic theory, *Economics and the Mathematical Methods*, 3 (37) (2001) 111–126.
- [8] **T. Brüchet, H. Tulkens,** Beyond BAT: Selecting optimal combinations of available techniques, with an example from the limestone industry, *Journal of Environmental Management*, 90 (2009) 1790–1801.
- [9] **S.M.S.M.K. Samarakoon, O.T. Gudmestad,** The IPPC Directive and technique qualification at

offshore oil and gas installations, *Journal of Cleaner Production*, 19 (2011) 13–20.

[10] **C. Polders, L. Van den Abeele, A. Derden, D. Huybrechts**, Methodology for determining emission levels associated with the best available techniques for industrial waste water, *Journal of Cleaner Production*, 29–30 (2012) 113–121.

[11] **G. Mavrotas, E. Georgopoulou, S. Mirasgedis, Y. Sarafidis, D. Lalas, V. Hontou, N. Gakis**, An integrated approach for the selection of best available techniques (BAT) for the industries in the greater Athens area using multi-objective combinatorial optimization, *Energy Economics*, 29 (4) (2007) 953–973.

[12] **D.J. Stekhoven, P. Bubhmann**, MissForest—non-parametric missing value imputation for mixed-type data. *Bioinformatics*, 28 (1) (2012) 112–1180.

[13] **A.L. Carretero, J. de la Rosa, D. Sanchez-Rodas**, Applying statistical tools systematically to determine industrial emission levels associated with the best available techniques. *Journal of Cleaner Production*, 112 (5) (2016) 4226–4236.

[14] **C.E. Shannon**, A mathematical theory of communication, *Bell system technical journal*, 27 (1948) 379–423.

[15] **I.V. Prangishvili**, Entropy and other systemic regularities: Questions of complex systems controlling. Moscow, Nauka, 2003.

[16] **A.S. Ptuskin, E. Levner, Ju.M. Zhukova**, A Multi-Criteria Model of Determining the Best Available Technology Under Fuzzy Input Data, *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 6 (111) (2016) 105–127.

[17] **Ye.V. Levner, A.S. Ptuskin**, On a selection of directions of enterprise modernization based on an information entropy model of economic risk, *Economics and mathematical methods*, 50 (2) (2014) 111–126.

[18] **I.B. Huang, J. Keisler, I. Linkov**, Multi-criteria decision analysis in environmental science: ten years of applications and trends, *Science of the Total Environment*, 409 (2011) 3578–3594.

[19] **V. Ibáñez-Foriñs, M.D. Bovea, V. Pírez-Belis**, A holistic review of applied methodologies for assessing and selecting the optimal technological alternative from a sustainability perspective, *Journal of Cleaner Production*, 70 (2014) 259–281.

[20] **M. Herva, E. Roca**, Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation, *Journal of Cleaner Production*, 39 (2013) 355–371.

[21] **E. Levner, L. Meyzin, A. Ptuskin**, Periodic Scheduling of a Transporting Robot under Incomplete Input Data: A Fuzzy Approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 98 (3) (1998) 255–266.

**PTUSKIN Alexander A.S.** E-mail: aptuskin@mail.ru