

ЭНТРОПИЙНЫЙ МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

АЛЕКСАНДР СОЛОМОНОВИЧ ПТУСКИН (ORCID 0000-0002-1192-5506)

КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана

Аннотация. С учетом увеличения техногенной нагрузки на природные системы возрастает актуальность экологических проблем. Современные принципы экологического нормирования основаны на использовании концепции наилучших доступных технологий (НДТ). Критическая задача заключается в определении того, какая из конкурирующих альтернативных технологий является наилучшей. Предлагается метод многокритериального выбора НДТ, в котором в терминах информационно-энтропийного подхода оценивается уровень уверенности в том, что конкретная технология может быть признана наилучшей с точки зрения каждого отдельного критерия, а затем отдельные оценки объединяются.

Ключевые слова: наилучшие доступные технологии; информационная энтропия, многокритериальное принятие решений.

Основной принцип экологического регулирования деятельности промышленных предприятий, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду, состоит в применении концепции наилучших доступных технологий (НДТ). НДТ определяется в [1] следующим образом: «Технологический процесс, технический метод, основанный на современных достижениях науки и техники, направленный на снижение негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду и имеющий установленный срок практического применения с учетом экономических, технических, экологических и социальных факторов».

Использование этой концепции стимулирует быструю динамику развития экологических инновационных технологий и позволяет минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Проблемой остается идентификация НДТ [2], то есть выбор из альтернативных

Abstract. Taking into account the increase in the technogenic burden on natural systems, the urgency of environmental problems is increasing. Modern principles of environmental regulation are based on the use of the concept of best available techniques (BAT). The critical problem is to determine which of the competing alternative technologies is the best. A method for multi-criteria selection of BAT is proposed, in which in terms of the information-entropy approach the level of confidence is established that a particular technology can be recognized as the best from the standpoint of each individual criterion and then individual estimates are combined.

Keywords: best available techniques, information entropy, multi-criteria decision making.

технологий той, которая обеспечивает наиболее высокий уровень охраны окружающей среды с учетом воздействия на различные ее компоненты, а также технологических, экономических и социальных критериев.

Как показывает обзор [3] основной подход к определению НДТ состоит в использовании методологии многокритериального принятия решений. Причем наиболее часто используются метод многокритериальной теории полезности MAUT, метод анализа иерархий АНР, метод TOPSIS, согласно которому наилучшая альтернатива должна быть наиболее близкой к идеальному решению и наиболее далека от отрицательного идеального решения, метод взвешенной суммы критериев Weighted Sum Method, метод ELECTRE, в котором используются четкие бинарные отношения между альтернативами, метод PROMETHEE, в котором устанавливается отношение предпочтения между вариантами.

Несмотря на большое число публикаций, посвященных этой проблеме, совершенствование и разработка новых методов выбора НДТ остается актуальной задачей [4, 5]. Применение оптимизационных моделей дает объективную основу для принятия обоснованных решений. В настоящей работе предлагается метод выбора наилучшей технологии, основанный на энтропийных оценках. Информационная энтропия измеряет уровень неопределенности состояния некоторой системы [6]. Энтропийные модели сложных систем и их различные приложения при анализе и управлении производственными, социальными и бизнес-процессами рассмотрены, например, в работах [7, 8] и многих других.

Идентификация разрабатываемых в рамках проекта моделей в соответствии с принципами, предложенными Г.Б. Клейнером [9], может быть представлена следующим образом. Модели относятся к классу моделей экономического объекта. Объектом моделирования являются технологии, оказывающие воздействие на окружающую среду. Цель построения моделей состоит в определении технологий, обеспечивающих наилучшее сочетание критериев достижения целей охраны окружающей среды при условии наличия экономической и технической возможности их применения. Применяемый математический аппарат – методы исследования операций. Используемый инструментарий – информационно-энтропийный подход.

Сравнение уровней негативного воздействия альтернативных технологий на окружающую среду является основой для определения НДТ [10]. Проблема многокритериального принятия решений по выбору наилучшей из n технологий, оцениваемых по m входным и выходным потокам, может быть представлена в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} x(1,1) & \cdots & x(1,m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x(n,1) & \cdots & x(n,m) \end{bmatrix},$$

$$[w(1) \ w(2) \ \dots, \ w(m)],$$

где

$x(i,j)$ – оценка альтернативной технологии i по характеристике j ; $j = 1, \dots, m$; $i = 1, \dots, n$;

$w(1); w(2); \dots; w(m)$ – веса характеристик.

Каждая альтернатива оценивается по нескольким независимым критериям. Процедура определения стабильных значений критериев для альтернативных технологий представлена в [11]. Для простоты будем рассматривать только экологические критерии, значения которых требуется минимизировать.

Выберем критерий j и технологию i . Будем рассматривать событие, состоящее в том, что «значение критерия j для НДТ равно значению этого критерия для технологии i ».

Оценка альтернативных технологий по отдельному критерию увеличивает либо уменьшает уровень знания о том, что определенная технология является наилучшей.

При отсутствии информации о величинах потоков $x(i,j)$ вероятность определенного выше события $p(i,j) = 1/n$, а энтропийная оценка уровня знания об этом событии:

$$H_0(i,j) = - (1/n) \log (1/n) - (1 - (1/n)) \log (1 - (1/n)).$$

При известных значениях $x(i,j)$, следуя [12], вероятность того, что критерий j в НДТ примет значение $x(i,j)$ можно определить:

$$p(i,j) = 1 - x(i,j) / \sum_i x(i,j).$$

Соответственно меняется энтропийная оценка уровня знаний о событии:

$$H(i,j) = - p(i,j) \log p(i,j) - (1 - p(i,j)) \log (1 - p(i,j)).$$

Изменение величины энтропии:

$$DH(i,j) = H_0(i,j) - H(i,j).$$

Если $DH(i,j) > 0$, то есть энтропия уменьшается, уверенность в том, что технология i будет наилучшей, возрастает, причем, чем больше это изменение $DH(i,j)$, тем в большей степени. Соответственно, если $DH(i,j) < 0$, то есть энтропия возрастает, уверенность в том, что технология i будет наилучшей, убывает.

Энтропия характеризует среднюю неопределенность выбора одного состояния из статистического ансамбля, полностью игнорируя содержательную сторону ансамбля [13], например, энтропия для события с вероятностью p равна энтропии для события с вероятностью $1 - p$. Это требует дополнительной оценки возникающих ситуаций.

Предложенное выше определение величины $DH(i,j)$ справедливо для $p(i,j) \geq 0,5$. В случае $p(i,j) < 0,5$:

$$DH(i,j) = (H_0(i,j) - 1) - (1 - H(i,j)) < 0.$$

Определим $DH(i,j)$ для всех $j = 1, \dots, m$; $i = 1, \dots, n$. Тогда степень уверенности в том, что технология i является наилучшей с учетом всех критериев, можно определить:

$$C(i) = \sum_j w(j) DH(i,j).$$

Наилучшей является технология t с наибольшим значением:

$$C(t) = \max \{C(i) \mid i = 1, \dots, n\}.$$

Метод может быть использован как в случае, если цель выбора состоит в минимизации критериев, так и в случае максимизации критериев. В последнем случае меняются оценки значений $p(i,j)$ и $DH(i,j)$.

Для выбора НДТ, помимо экологических, учитываются экономические, технические, политические и социальные критерии. Классификация критериев может быть произведена по следующим группам:

– экологические критерии: выбросы, сбросы, генерация отходов и шламов, восстановление/повторное использование, энергетический баланс, использование ма-

териалов, экологический риск и ущерб, шум и запахи, другие экологические критерии;

– экономические критерии: срок окупаемости, чистая приведенная стоимость, инвестиционная стоимость, операционные и эксплуатационные расходы, финансовые возможности, рыночная зрелость, другие экономические критерии;

– технические критерии: требования к площадям, производительность, техническая осуществимость, требования к обслуживанию, срок службы, простота использования, совместимость с текущими процессами, простота внедрения технологий, вероятность отказа, другие технические критерии;

– социальные критерии: восприятие сообществом, охрана труда и техника безопасности, влияние на здоровье человека, социальные льготы, создание рабочих мест, другие критерии;

– политические критерии: политическая и законодательная база, стандарты, государственная поддержка, другие политические критерии.

Предложенный энтропийный метод многокритериального выбора может быть расширен для задачи определения наилучшей доступной технологии с учетом многоэтапности процедуры выбора. В этом случае модель агрегированной оценки альтернативных технологий с учетом различных групп критериев принимает иерархическую структуру. Для каждой группы критериев определяется комплексная оценка таким же образом, как и при определении уровней негативного воздействия на окружающую среду. Для каждой группы определяется вес, соответствующий значимости группы критериев в агрегированной оценке, и выбирается наилучшая технология.

Численные примеры показывают, что предлагаемая процедура является надежной и эффективной.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 18–410–400001).

Список источников

1. ГОСТ Р 54097-2010 «Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации».
2. Гусева Т.В., Молчанова Я.П., Бегак М.В., Мионов А.В. Наилучшие доступные технологии как инструмент промышленной и экологической политики. Вестник РХТУ им. Д. И. Менделеева: Гуманитарные и социально-экономические исследования. 2015;(2(6)):62–76.
3. Giner-Santonja G., Aragonés-Beltrán P., Nicolás-Ferragut J. The application of the analytic network process to the assessment of best available techniques. Journal of Cleaner Production. 2012;(25):86–95.
4. Ibáñez-Forés V., Bovea M.D., Pérez-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;(70):259–281.
5. Bréchet T., Tulkens H. Beyond BAT: Selecting optimal combinations of available techniques, with an example from the limestone industry. Journal of Environmental Management. 2009;(90):1790-1801.
6. Shannon, C. E. A mathematical theory of communication. Bell system technical journal. 1948;(27):379-423.
7. Левнер Е.В., Птускин А.С. О выборе направлений модернизации предприятий на основе информационно-энтропийной модели хозяйственного риска. Экономика и математические методы. 2014;(50(2)):111-126.
8. Levner E., Ptuskin A. Entropy-based model for the ripple effect: managing environmental risks in supply chains. International Journal of Production Research. 2018;(56(7)):2539-2551.
9. Клейнер Г.Б. Экономико-математическое моделирование и экономическая теория. Экономика и математические методы. 2001;(37(3)):111-126.
10. 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):105–127.
11. Птускин А.С. Энтропийный метод анализа данных для процедуры определения НДТ. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2018;(11(3)):203-212.
12. Zeleny M. Multiple criteria decision making. McGraw-Hill, New York, 1982.
13. Давыдов А.В. Сигналы и линейные системы. Тематические лекции. Екатеринбург. 2005.