

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИЛУЧШЕЙ ДОСТУПНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ НЕЧЕТКИХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

А.С. Птускин¹

Е. Левнер²

Ю.М. Жукова¹

aptuskin@mail.ru

eli_levner@bezeqint.net

dazhf1@mail.ru

¹ Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация

² Ашкелонский Академический колледж, Ашкелон, Израиль

Аннотация

Рассмотрена проблема выбора наилучших доступных технологий, на основании которых нормируется и регулируется негативное воздействие промышленных производств на окружающую среду. Сравнение альтернативных технологических вариантов — комплексная задача, в которой должны быть учтены многочисленные экологические, технологические, экономические и социальные критерии. Основным условием выбора инструментария для принятия решений по наилучшим доступным технологиям определена возможность адекватного учета неопределенности. Для ключевого этапа оценки альтернативных технологий — сравнения уровней негативного воздействия на окружающую среду — построена модель многокритериального принятия решений с нечеткими параметрами и предложен нечеткий вариант метода TOPSIS. Разработан пошаговый алгоритм ее решения, позволяющий оперировать неоднозначными нечеткими входными данными, субъективными мнениями экспертов. Иллюстрация предложенного метода на реальном примере свидетельствует о его эффективности и способности обеспечить объективное принятие решений

Ключевые слова

Экология, наилучшие доступные технологии, эколого-экономические модели, многокритериальное принятие решений, теория нечетких множеств

Поступила в редакцию 19.04.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда и Правительства Калужской области (проект № 16-12-40002a(p))

Введение. Вопросы охраны окружающей среды и состояния экологической безопасности становятся все более актуальными, и не случайно рациональное природопользование относится к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ, а 2017 г. объявлен Годом экологии. Решение экологических проблем основано на реализации концепции устойчивого развития, т. е. длительного непрерывного развития общества, обеспечивающего потребности живущих сегодня людей без ущерба для удовлетворения потребностей будущих поколений. Основным источником негативного воздействия на окружающую среду является промышленное производство. Полностью исключить это воздействие невозможно, поэтому важно применять рациональные принципы и методы регулирования

охраны окружающей среды, стимулирующие быструю динамику развития новых экологических технологий [1]. Одним из ключевых элементов в решении эколого-экономических задач является внедрение принципов наилучших доступных технологий (НДТ), на основании которых проводится нормирование и регулирование деятельности промышленных производств, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду (энергетических, металлургических, химических и др.). В Федеральном законе № 219-ФЗ [2] термин *наилучшая доступная технология* определяется следующим образом: «технология производства продукции (товаров), выполнения работ, оказания услуг, определяемая на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды при условии наличия технической возможности ее применения».

В настоящее время в международных стандартах ужесточаются требования в отношении экологии и безопасности производственных процессов [3]. Опыт развитых стран показывает, что выдача комплексных разрешений на выбросы, сбросы и размещение отходов, основанных на использовании норм, определенных в соответствии с НДТ, является эффективным инструментом и позволяет минимизировать основные виды негативного воздействия на окружающую среду, а также обновить основные фонды, создать энергоэффективные и ресурсосберегающие производственные мощности, повысить конкурентоспособность промышленности. Действовавшая в РФ до недавнего времени фискальная система нормирования воздействия на окружающую среду характеризуется низкой эффективностью. Федеральный закон № 219-ФЗ [2] закрепляет изменения в природоохранном законодательстве страны и переход на новые, основанные на НДТ принципы нормирования, внедрение экономических механизмов стимулирования применения чистых технологий и усиление ответственности предприятий, загрязняющих окружающую среду, за несоблюдение нормативов.

Критическая проблема при внедрении НДТ заключается в определении, какая из альтернатив является наилучшей. Рамочные принципы решения этой задачи описаны в справочном документе «Экономические аспекты и вопросы воздействия на различные компоненты окружающей среды» [4]. Он разработан в целях формирования научно-методической базы и устанавливает общий порядок решения задачи. Сравнение альтернативных технологических вариантов является комплексной задачей, в которой должны быть учтены многочисленные экологические, технологические, экономические и социальные критерии. При выборе необходимо учитывать вопросы воздействия на различные компоненты окружающей среды, выбор может быть сделан между выбросами или сбросами в различные среды. Следует учитывать вероятное влияние разных загрязняющих веществ на семь приоритетных экологических проблем (токсичность для человека, глобальное потепление, токсичность для водных объектов, закисление, эвтрофикация, истощение озонового слоя, потенциал образования тропосферного озона). Должны быть детально учтены местные проблемы. Каждый вариант оценивается в отношении доступности с экономической точки

зрения. Практически во всех случаях на всех стадиях процесса выбора НДТ возникают сложные, плохо формализуемые задачи, описываемые неоднозначными характеристиками, для подготовки заключения необходимо прибегать к экспертной оценке.

Недостаточное число научно обоснованных экологических методов принятия решений существенно затрудняет этот процесс. Официально принятые методологии сегодня успешно работают только в простейших ситуациях и не могут дать однозначный выбор альтернативного решения в сложных эколого-экономических задачах. Ввиду сложности, многокритериальности и многоаспектности проблемы разработка эколого-экономико-математических моделей и методов оценки альтернативных вариантов и идентификации наилучшей технологии является важным направлением в данной предметной области. В настоящей работе обосновывается постановка проблемы определения НДТ как модели многокритериального принятия решений с нечеткими параметрами и предлагается метод ее решения.

Краткий обзор литературы. В последние годы растет число отечественных публикаций по тематике НДТ. Следует отметить, что в большинстве публикаций раскрываются и уточняются основные положения общей методологии выбора НДТ, анализируется опыт ее применения для различных отраслей и предприятий. Для проблемы определения НДТ справедливо утверждение работы [5] о том, что расширение арсенала инструментально-математических средств моделирования относится к основным направлениям повышения качества экономико-математических моделей и повышения их эффективности в хозяйственной практике. В настоящей статье при анализе НДТ мы рассматриваем не только собственно технологические решения, но и эффективные методы оптимального экономико-экологического планирования и стратегического экологического нормирования и контроля качества окружающей среды. Применение оптимизационных эколого-экономико-математических моделей дает научную основу для принятия обоснованных решений. Однако задача разработки научно обоснованных инструментальных и математических моделей и методов этой сложной и многоаспектной проблемы рассматривается в крайне немногочисленных отечественных исследованиях. Так, в работе [6] на основе системного подхода и с использованием математического аппарата теории множеств предложена системная модель НДТ, которая позволяет единообразно ставить и решать задачу идентификации технологии для производства различных химических продуктов. В работе [7] представлена характеристика экспертной системы оценки эколого-экономической эффективности НДТ и измерения стоимости интеллектуального труда как основного фактора этой эффективности. Методический подход к определению НДТ рассмотрен в статье [8]. Отмечено, что разработка научно-методического аппарата определения конечного перечня наилучших из всей совокупности возможных отечественных доступных технологий представляет собой решение комплекса взаимосвязанных и достаточно сложных научных задач с учетом специфики каждой из отраслей промышлен-

ности. Авторы рассматривают совокупность принципиально доступных технологий и процесс их развития как сложную систему, для которой применимы методы векторного анализа систем, основанные на введении результирующих показателей качества и доступной технологии — минимаксные методы, показателей эффективности, на переводе всех показателей доступных технологий, кроме одного, в ряд ограничений, а также метод последовательных уступок.

Имеется гораздо большее число зарубежных публикаций, посвященных концепции НДТ и применению математических моделей и методов для выбора наилучшей альтернативы. Как отмечено в [9], основной подход к определению НДТ состоит в использовании методологии анализа многокритериального принятия решений. Авторы приводят обширный перечень публикаций, в которых методы анализа многокритериального принятия решений были использованы для отдельных аспектов оценки НДТ. Многокритериальное принятие решений предлагает системный подход к созданию гибких методологий решения сложных проблем выбора из нескольких альтернатив, каждая из которых оценивается большим числом различных критериев или факторов и сопровождается конфликтами представлений, интересов и оценок. В работе [10] анализ многокритериального принятия решений для оценки НДТ определяется как термин, который включает в себя набор концепций, методов и приемов, направленных на принятие решений, которые включают в себя несколько конфликтующих точек зрения и многочисленные заинтересованные стороны.

В обзоре [11] подчеркнуто, что процесс принятия решений по экологическим проблемам требует учета компромиссов между социально-политическими, экологическими и экономическими последствиями, осложняется различными взглядами заинтересованных сторон, а формальная методология многокритериального анализа решений может быть особенно эффективна для таких проблем. Однако проведенный в обзоре анализ работ, в которых для одной проблемы параллельно были использованы различные методы, показал, что применение различных методов многокритериального принятия решений приводит к аналогичным рейтингам альтернатив управления окружающей средой. Обширный обзор литературы, посвященной процессу оценки и выбора НДТ, представлен в работе [12]. Исследование дает целостный анализ текущих тенденций в методах, которые могут быть применены на различных стадиях процесса. Идентифицированы наиболее широко используемые критерии, источники информации, математические методы, которые используются для сравнения вариантов и выбора лучших технологических альтернатив. Авторы подчеркивают, что нечеткие методы используются в небольшом числе работ.

Считаем необходимым условием при выборе инструментария для принятия решений по НДТ возможность адекватного учета неопределенности. Трудно найти точные данные о характеристиках и потенциальных воздействиях технологий, и это еще один важный подводный камень, препятствующий правильной реализации концепции НДТ [13]. В большинстве случаев процесс принятия решений происходит в условиях неопределенности, неточной информации, когда

цели, ограничения, условия возможных вариантов действий точно не известны. Традиционно при этом используется стохастический подход. Однако когда невозможно задать закон распределения случайной величины, а неопределенность обуславливается еще и качественным характером параметров, необходимо применение других средств. На этапе сравнения вариантов и выбора лучшей альтернативы применение процедуры нечеткого многокритериального принятия решений является обоснованным, и в настоящей работе предлагается ее использование. Задача включает в себя множество параметров, возможные значения которых не могут быть определены точно и однозначно, что и предопределяет представление параметров нечеткими числами. В отличие от традиционных методов количественного анализа, для которых возможности оперировать с неоднозначной, неточной, размытой информацией ограничены по существу, аппарат теории нечетких множеств позволяет включить в анализ задачи неформализованные, нечеткие входные данные, субъективные мнения и суждения экспертов. Развитие методов многокритериального принятия решений получило новое направление с появлением теории нечетких множеств. Нечеткая логика оперирует уровнями допустимости решения, что позволяет рассматривать несколько альтернативных решений многокритериальных проблем и, если конфликт представлений, интересов и оценок не четко определен, а является мягким, размытым, позволяет находить компромиссы, так как предоставляет лицу, принимающему решение, большую степень свободы [14]. Общая методология моделирования представлена, например, в работах [15–17].

Из публикаций, проанализированных в [12] и использующих аппарат нечетких множеств, три работы [18–20] представляют общий обзор возможных методов многокритериального анализа решений и обосновывают продуктивность использования нечеткой логики. В работе [21] рассмотрена проблема выбора технологии производства электроэнергии. Выбор проводится по экспертным оценкам показателей, заданным лингвистическими переменными. Учитываются экономические и технические, но не экологические показатели альтернатив. В [22] предложены методы анализа и оценки рисков принятия решений для оценки, ранжирования и выбора предпочтительных альтернатив технологий рекультивации загрязненных территорий и обращения с отходами. Используется метод анализа иерархий, а важность критериев оценивается в терминах теории нечетких множеств. В [23] применен нечеткий вариант метода анализа иерархий для выбора технологии очистки питьевой воды с учетом рисков для здоровья человека и используется понятие информативной энтропии для интегральной объективной оценки важности отдельных показателей. В работе [24] для определения НДТ приведен нечеткий метод PROMETHEE на примере выбора технологии производства чугуна и стали. В [25] использованы нечеткие логические правила для того, чтобы сравнить конкретную технологию с технологией, определенной в справочнике НДТ. В [26] рассмотрен метод анализа иерархий для выбора технологий органических светодиодов, но без учета экологических критериев. Нечеткие критерии переводятся в четкие числа, для дефаззификации используется ме-

тод центра тяжести. В [27] предложен метод нечеткого иерархического принятия решений, который проиллюстрирован на примере выбора технологии производства чугуна. В [28] приведена оценка НДТ для обработки пластиковой воды. Значения экологических критериев первоначально представляются нечеткими числами, но трансформируются в четкие индексы. В [29] решена многокритериальная задача выбора тригенерационных систем с применением метода анализа иерархий. Учтены технологические, экономические, экологические и социальные критерии, но экологические представлены четкими числами.

Мы также строим модель многокритериального принятия решений с нечеткими параметрами, но в отличие от указанных работ для решения проблемы определения НДТ предлагаем нечеткий вариант метода TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) и не проводим дефазификацию уровней негативного воздействия и их значимостей на всех этапах процедуры.

Модель многокритериального принятия решений. Ключевым этапом оценки альтернативных технологий является сравнение уровней негативного воздействия на окружающую среду. Затем, после ранжирования технологий с точки зрения экологической результативности, оцениваются доступность с экономической точки зрения, т. е. экономическая эффективность внедрения и эксплуатации; применение энерго- и ресурсосберегающих методов; временной период внедрения [30]. Определим содержание задачи выбора технологии с наименьшим воздействием на окружающую среду в терминах многокритериального принятия решений.

Рассмотрим указанные этапы более подробно. Первым шагом оценки НДТ с точки зрения их воздействия на окружающую среду является определение набора альтернативных технологий, претендующих на статус наилучшей. Критериями являются определяющие каждую альтернативу характеристики — уровни негативного воздействия на окружающую среду, оцениваемые на основании перечня загрязняющих веществ, их объема или массы в расчете на единицу времени или объем производимой продукции. Наша цель — выбор оптимальной технологической альтернативы, наилучшим образом обеспечивающей комплексное предотвращение или минимизацию негативного воздействия на окружающую среду, т. е. желаемые значения набора критериев, выбранные лицом, принимающим решение. Каждый критерий имеет свой вес — относительную важность с точки зрения воздействия на окружающую среду.

Для определения технологии в качестве НДТ приходится прибегать к экспертной оценке. Экспертами могут быть представители органов исполнительной власти, научных организаций, некоммерческих организаций, технических рабочих групп, заинтересованных предприятий. Их оценки могут различаться.

Предлагаемая далее методология многокритериального принятия решений предполагает создание формальной модели и использование аппарата нечетких множеств. Введем следующие формальные обозначения. Имеется набор из p альтернативных технологий. Каждая технология оценивается по n критериям. В процессе принятия решений учитываются представления m экспертов. Каж-

дый критерий определяется оценкой и весом критерия: w_{ij} — оценка веса i -го критерия j -м экспертом; r_{kij} — оценка для k -й технологии i -го критерия j -м экспертом; $k = 1, \dots, p$; $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$.

Матрица оценок и весов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспертных оценок

Технологии	Критерии	1					...	i					...	n				
	Эксперты	1	...	j	...	m	...	1	...	j	...	m	...	1	...	j	...	m
1	Оценки	r_{111}	...	r_{11j}	...	r_{11m}	...	r_{1i1}	...	r_{1ij}	...	r_{1im}	...	r_{1n1}	...	r_{1nj}	...	r_{1nm}
...	
k		r_{k11}	...	r_{k1j}	...	r_{k1m}	...	r_{ki1}	...	r_{kij}	...	r_{kim}	...	r_{kn1}	...	r_{knj}	...	r_{knm}
...	
p		r_{p11}	...	r_{p1j}	...	r_{p1m}	...	r_{pi1}	...	r_{pij}	...	r_{pim}	...	r_{pn1}	...	r_{pnj}	...	r_{pnm}
Веса		w_{11}	...	w_{1j}	...	w_{1m}	...	w_{i1}	...	w_{ij}	...	w_{im}	...	w_{n1}	...	w_{nj}	...	w_{nm}

Процесс принятия решений начинается с получения и подготовки информации. При разработке альтернатив лицо, принимающее решение, всегда сталкивается с неопределенностью; ему приходится прогнозировать возможности и следствия реализации каждой альтернативы. Прежде всего по каждой технологии (в наших обозначениях число технологий p) должен быть представлен перечень критериев (в наших обозначениях число критериев n) — значимых входных и выходных потоков (потребляемого сырья, материалов, выбросов, сбросов загрязняющих веществ, отходов, энергии) и величины этих потоков [4]. Количественные показатели (в наших обозначениях величины r_{kij}) могут быть получены из данных мониторинга на существующих подобных производствах, отчетных материалов, экспериментальных и расчетных данных, информации от поставщиков или изготовителей оборудования. Учитывая различные источники информации, точность данных не может быть признана абсолютной. Вероятностный подход в данном случае не применим, так как законы распределения случайных величин, как правило, неизвестны. В то же время можно определить минимальные, максимальные и наиболее возможные значения показателей, что позволяет предложить естественное адекватное представление параметров нечеткими числами. Для них в настоящей статье будем использовать треугольные функции принадлежности, удобные для выполнения операций с нечеткими числами и снижающие трудоемкость компьютерной реализации, однако предложенная далее методология является достаточно гибкой и легко перестраивается для оперирования с другими функциями принадлежности.

Количественные показатели входных и выходных потоков имеют неодинаковую размерность, поэтому для сравнения альтернатив необходим процесс нормализации, что позволит привести их к сопоставимому виду. Для этого может быть применим, например, стандартный метод линейного масштабирования, реализуемый для случая нечетких величин.

Необходимо ранжировать приоритеты в отношении основных экологических проблем или отдельных загрязняющих веществ, т. е. определить относительные важности или веса критериев (в наших обозначениях w_{ij}). Вес критерия может значительно зависеть от условий окружающей среды на местном уровне. Необходимо учитывать [4]: оценку вклада рассматриваемой технологии в общее поступление загрязняющего вещества; качество окружающей среды; присутствие чувствительных реципиентов; характер последствий воздействия на окружающую среду (долгосрочные необратимые либо краткосрочные); стойкость, биоаккумуляцию, токсические и канцерогенные эффекты загрязняющего вещества. Определение весовых коэффициентов имеет субъективный характер и требует согласования мнения экспертов (в наших обозначениях число экспертов m). Часто эксперты имеют неоднозначную информацию о предпочтениях и не могут определить их точными числовыми значениями. Поэтому более реальный подход для выражения предпочтений заключается в использовании вербальных утверждений вместо числовых величин [31]. Значимости критериев могут быть описаны в терминах нечетких множеств и представляться лингвистическими переменными. Для описания лингвистических переменных также будем использовать треугольные функции принадлежности, определенные на универсальном множестве, представленном интервалом $[0, 1]$. Агрегирование мнений экспертов, т. е. обобщение весов w_{ij} с учетом мнений всех экспертов, может быть произведено, например, с использованием операторов нечеткого взвешенного агрегирования [14].

Для задач многокритериального принятия решений существуют различные методы, выбор которых зависит от особенностей каждой проблемы. Наиболее простым можно считать ранжирование сумм взвешенных значений критериев по каждой альтернативе. Представляется, что для определения НДТ адекватным способом решения является нечеткий вариант метода TOPSIS. Концепция метода TOPSIS состоит в том, что наилучшая альтернатива должна быть наиболее близкой к идеальному решению и наиболее далека от отрицательного идеального решения [32]. Мера расстояния — это термин, определяющий разность между нечеткими множествами, известны разные способы ее определения. Для треугольных нечетких чисел будем использовать способ, предложенный в [33].

Основные этапы процедуры выбора показаны на рис. 1. Представим более подробно их содержание и предлагаемые инструментальные средства. Операции с нечеткими числами приведены, например, в работах [15, 16].

Метод решения задачи выбора НДТ по критерию уровня негативного воздействия на окружающую среду. Шаг 1. Оценка i -го критерия производится j -м экспертом для технологии k с указанием минимального r_{kij}^{\min} , максимального r_{kij}^{\max} и наиболее возможного r_{kij}^{pos} значений соответствующего потока, отображаемого в нечеткое треугольное число:

$$r_{kij} = \left(r_{kij}^{\min}, r_{kij}^{\text{pos}}, r_{kij}^{\max} \right); \quad k=1, \dots, p; \quad i=1, \dots, n; \quad j=1, \dots, m.$$



Рис. 1. Схема сравнения альтернативных технологий по уровням негативного воздействия на окружающую среду

Шаг 2. Оценки экспертов должны быть обобщены для того, чтобы получить единственную оценку \underline{r}_{ki} . Воспользуемся следующей простой процедурой агрегирования:

$$\underline{r}_{ki} = (r_{ki1} + \dots + r_{kim}) / m; \quad k = 1, \dots, p; \quad i = 1, \dots, n.$$

Предполагается, что эксперты должны иметь достаточный опыт и привести доказательства в пользу своего мнения, однако на этом шаге возможно применение процедуры выявления аномальных значений как ошибок 1-го рода и их исключения с использованием стандартных методов [34].

Шаг 3. Для нормирования величин \underline{r}_{ki} применим метод линейного масштабирования.

Определим для каждого критерия i его максимальное значение по всем технологиям:

$$N_i = \max \{ \underline{r}_{ki} \mid i = 1, \dots, n \mid k = 1, \dots, p \}.$$

Минимальное значение соответствует отсутствию потока, т. е. нулевому потоку. Нормированные значения определим следующим образом:

$$R_{ki} = \underline{r}_{ki} / N_i; \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, p.$$

Шаг 4. Для определения весов критериев также обобщаются оценки экспертов. Оценка веса критерия i осуществляется экспертом j в качественной форме с помощью значения лингвистической переменной, выбираемой из термножества T (вес критерия) и отображаемой в нечеткое число w_{ij} , $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$. Агрегирование экспертных оценок веса i -го критерия определяется как

$$\underline{w}_i = (w_{i1} + \dots + w_{im}) / m; \quad i = 1, \dots, n.$$

Шаг 5. Условием комплексной оценки с учетом весов является их нормирование. Распространив это условие для случая с нечеткими весами, получим нормированные нечеткие веса критериев:

$$W_i = \underline{w}_i / (w_1 + \dots + w_n); \quad i = 1, \dots, n.$$

Шаг 6. Определим в результате комплексную оценку негативного воздействия на окружающую среду k -й технологии в виде нечеткого числа:

$$N_k = W_1 R_{k1} + \dots + W_n R_{kn}; \quad k = 1, \dots, p.$$

Поскольку мы используем треугольные нечеткие числа, другая форма записи этого числа:

$$N_k = (N_k^{\min}, N_k^{\text{pos}}, N_k^{\max}).$$

Шаг 7. Для сравнения альтернатив и выбора наилучшей с использованием нечеткого варианта метода TOPSIS необходимо определить идеальное решение N^+ и отрицательное идеальное решение N^- . Идеальное решение соответствует нулевым значениям потоков, т. е. полному отсутствию негативного воздействия $N^+ = 0$. Отрицательным идеальным решением будем считать вариант с наихудшими (максимальными) значениями потоков N_i по каждому критерию из всех альтернатив, $i = 1, \dots, n$. Соответственно $N = W_1 N_1 + \dots + W_n N_n$.

Шаг 8. Для каждой технологии $k = 1, \dots, p$ определим меру расстояния комплексной оценки N_k от идеального решения $N^+ = (N^{+\min}, N^{+\text{pos}}, N^{+\max})$ и отрицательного идеального решения $N^- = (N^{-\min}, N^{-\text{pos}}, N^{-\max})$:

$$d(N_k, N^+) = \left(1/3 \left[(N^{+\min} - N_k^{\min})^2 + (N^{+\text{pos}} - N_k^{\text{pos}})^2 + (N^{+\max} - N_k^{\max})^2 \right] \right)^{1/2}, \quad k = 1, \dots, p;$$

$$d(N_k, N^-) = \left(1/3 \left[(N^{-\min} - N_k^{\min})^2 + (N^{-\text{pos}} - N_k^{\text{pos}})^2 + (N^{-\max} - N_k^{\max})^2 \right] \right)^{1/2}, \quad k = 1, \dots, p.$$

Шаг 9. Определим коэффициент близости каждой альтернативы с наилучшим решением

$$CC_k = \frac{d(N_k, N^-)}{d(N_k, N^-) - d(N_k, N^+)}, \quad k = 1, \dots, p.$$

Коэффициент близости находится в интервале $[0, 1]$. Чем больше его значение, тем лучше альтернативная технология с точки зрения минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Таким образом, мы можем определить порядок ранжирования альтернатив и выбрать лучшую технологию среди множества возможных альтернатив с наибольшим значением:

$$CC_b = \max \{CC_k | k=1, \dots, p\}.$$

Иллюстративный пример. Поясним предложенный метод на примере производства извести, ограничив процедуру выбора технологии оценкой выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и рассмотрением четырех альтернативных технологий.

Технологический процесс производства извести состоит из следующих стадий: дробление и помол; сортировка, транспортирование и дозирование; обжиг в печах; гашение извести. Пылеобразование происходит при эксплуатации основного технологического оборудования на всех стадиях: обжиговых печей, дробилок, грохотов, мельниц; при работе технологического транспорта: транспортеров, шнеков, питателей; при погрузочно-разгрузочных работах и т. п. Для обжига сырья применяют различные типы печей, при выборе учитываются факторы возможности обжига сырья с имеющимися гранулометрическими параметрами, возможность получения конечного продукта определенной степени обжига и реакционной способности. В качестве маркерных загрязняющих веществ при производстве извести следует принимать вещества, характеризующие химический состав и запыленность газов на выходе из печи, физико-химические свойства сырья и топлива, работу очистного оборудования и потери [35]. Маркерными загрязняющими веществами являются: неорганическая пыль, содержащая диоксид кремния, оксиды азота (NO_x), оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO_2), углерод (сажа (C)), диоксиды серы (SO_x). В зависимости от конструкции печи и используемого топлива варьируются температурные параметры, а также количественный и качественный состав выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Технология № 1. Для обжига известняка и получения негашеной комовой извести используются обычные шахтные печи. Теплота для вытеснения CO_2 из $CaCO_3$ подается в печь от твердого топлива, которое загружается в печь вместе с известняком, и от природного газа, который подводится в печь через встроенную центральную горелку. Отработанный газ откачивается в головке печи и падает в атмосферу через фильтровальную установку и трубу очищенного газа.

Технология № 2. Для обжига используется вращающаяся печь, сырье из сушилки поступает в печь через камеру холодного конца печи, в качестве сырья применяется мел. В печи происходит постепенный подогрев сырья и распад CaCO_3 на CO_2 и CaO . Регулировка оборотов и температуры продуктов сгорания может влиять на тип обжига извести. Подогрев вращающейся печи осуществляется с помощью печной горелки и с использованием природного газа. Обеспыливание печной линии осуществляется за счет пылеуловителя, который состоит из тканевого фильтра и радиального вентилятора, который обеспечивает вытяжку горячих выхлопных газов из печной линии.

Технология № 3. Для обжига используется вращающаяся печь с запечным теплообменником, в качестве сырья применяется доломит. Подогрев вращающейся печи осуществляется с помощью печной горелки и с использованием природного газа. Обеспыливание печной линии производится за счет пылеуловителя, который состоит из тканевого фильтра и радиального вентилятора, который обеспечивает вытяжку горячих выхлопных газов из печной линии.

Технология № 4. Для обжига используются пересыпные шахтные печи, в качестве сырья применяется доломит. Подогрев происходит за счет твердого топлива, которое загружается в печь вместе с доломитом, и от природного газа, который подводится в печь через встроенную центральную горелку. Отработанный газ откачивается в головке печи и попадает в атмосферу через фильтровальную установку и трубу очищенного газа.

Информация по четырем альтернативным технологиям, определенная тремя экспертами, представлена в табл. 2.

В табл. 3 приведены в виде нечетких чисел обобщенные по оценкам экспертов значения выбросов и их нормированные значения для каждой технологии.

В табл. 4 содержатся лингвистические оценки каждого эксперта (j) по каждому критерию (i) весов критериев (M); отображение оценок в нечеткие числа (w_{ij}); обобщенные оценки экспертов в виде нечеткого числа (w_i); нормированные нечеткие веса критериев (W_i).

Терм-множество лингвистических оценок весов критериев определено для данного примера следующим образом:

T (вес критерия) = {низкий; умеренный; высокий; чрезвычайно высокий}.

Функции принадлежности значений лингвистической переменной приведены на рис. 2 и упрощенно могут быть определены как наборы упорядоченных пар:

$M(\text{низкий}) = \{(0,1; 0,5), (0,2; 1), (0,3; 0,5)\}$;

$M(\text{умеренный}) = \{(0,3; 0,5), (0,4; 1), (0,5; 0,5)\}$;

$M(\text{высокий}) = \{(0,5; 0,5), (0,6; 1), (0,7; 0,5)\}$;

$M(\text{чрезвычайно высокий}) = \{(0,7; 0,5), (0,8; 1), (0,9; 0,5)\}$.

Эти данные могут отображаться в нечеткие числа (0; 0,2; 0,4); (0,2; 0,4; 0,6); (0,4; 0,6; 0,8); (0,6; 0,8; 1) соответственно.

Таблица 2

Показатели выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух

Вещество	Кри- терий <i>i</i>	Экс- перт <i>j</i>	Технология № 1			Технология № 2			Технология № 3			Технология № 4		
			k											
			Выбросы, мг/м ³											
			min	наибо- лее воз- можные	max	min	наибо- лее воз- можные	max	min	наибо- лее воз- можные	max	min	наибо- лее воз- можные	max
Пыль (неорганическая, со- держащая диоксид кремния)	1	1	80	130	180	120	146	172	5	82	160	10	55	100
		2	115	124	133	145	151	158	82	84	86	38	59	81
		3	117	120	124	145	151	157	83	83	84	57	60	64
Диоксиды азота (NO _x)	2	1	300	325	350	100	125	150	100	1050	2000	10	1005	2000
		2	324	334	345	105	122	140	119	918	1717	617	1193	1770
		3	330	336	342	115	119	124	199	617	1035	1091	1171	1251
Оксид углерода (CO)	3	1	750	1375	2000	150	475	800	40	1470	2900	10	1255	2500
		2	799	1316	1834	364	536	709	1423	1846	2270	190	1249	2308
		3	800	1191	1583	466	503	541	1520	1869	2218	787	1482	2177
Сажа (C)	4	1	0,5	0,65	0,8	0	0	0	0,2	55,1	110	1	50	100
		2	0,51	0,63	0,74	0	0	0	1,94	50,1	98,3	27	56	86
		3	0,58	0,6	0,63	0	0	0	19,8	48,8	77,7	48	53	59
Серы диоксид (SO)	5	1	150	155	160	0	0	0	5	752	1500	1	750	1500
		2	152	153	155	0	0	0	379	889	1399	365	831	1297
		3	152	152	153	0	0	0	0	0	0	680	846	1012
Хлористый водород (HCl)	6	1	0	0	0	0	0	0	0,1	20,0	40	0,1	20,0	40
		2	0	0	0	0	0	0	18,5	20,4	22,3	0,97	13,8	26,6
		3	0	0	0	0	0	0	19,9	21,0	22,1	13,0	17,6	22,2
Фтористый водород (HF)	7	1	0	0	0	0	0	0	10	25	40	0	0	0
		2	0	0	0	0	0	0	20	28	37	0	0	0
		3	0	0	0	0	0	0	28	28	29	0	0	0

Таблица 3

Обобщенные оценки экспертов и их нормированные значения по показателям выбросов

<i>i</i>	<i>k</i>	1	2	3	4
1	r_{ki}	<u>(104; 124,67; 145,67)</u>	<u>(136,67; 149,33; 162,33)</u>	<u>(56,67; 83; 110)</u>	<u>(35; 58; 81,67)</u>
	l_{ki}	(0,6; 0,8; 1,07)	(0,8; 1,0; 1,19)	(0,3; 0,5; 0,80)	(0,2; 0,3; 0,60)
2	r_{ki}	<u>(318; 331,67; 345,67)</u>	<u>(106,67; 122; 138)</u>	<u>(139,33; 861,67; 1584)</u>	<u>(572,67; 1123; 1673,67)</u>
	l_{ki}	(0,1; 0,3; 0,60)	(0,0; 0,1; 0,24)	(0,08; 0,77; 2,77)	(0,34; 1,0; 2,92)
3	r_{ki}	<u>(783; 1294; 1805,67)</u>	<u>(326,67; 504,67; 683,33)</u>	<u>(994,33; 1728,33; 2462,67)</u>	<u>(329; 1328,67; 2328,33)</u>
	l_{ki}	(0,32; 0,75; 1,82)	(0,13; 0,29; 0,69)	(0,4; 1,0; 2,48)	(0,13; 0,77; 2,34)
4	r_{ki}	<u>(0,53; 0,63; 0,72)</u>	<u>(0; 0; 0)</u>	<u>(7,34; 51,36; 95,37)</u>	<u>(25,33; 53; 81,67)</u>
	l_{ki}	(0,01; 0,01; 0,10)		(0,08; 1,0; 12,99)	(0,27; 1,03; 11,13)
5	r_{ki}	<u>(151,33; 153,33; 156)</u>	<u>(0; 0; 0)</u>	<u>(128; 547; 966,33)</u>	<u>(348,67; 809; 1269,67)</u>
	l_{ki}	(0,12; 0,19; 0,45)		(0,1; 0,68; 2,77)	(0,27; 1,0; 3,64)
6	r_{ki}	<u>(0; 0; 0)</u>	<u>(0; 0; 0)</u>	<u>(12,87; 20,53; 28,18)</u>	<u>(4,72; 17,18; 29,63)</u>
	l_{ki}	(0; 0; 0)		(0,46; 1,0; 2,19)	(0,17; 0,84; 2,30)
7	r_{ki}	<u>(0; 0; 0)</u>	<u>(0; 0; 0)</u>	<u>(19,33; 27; 35,33)</u>	<u>(0; 0; 0)</u>
	l_{ki}	(0; 0; 0)		(0,55; 1,0; 1,83)	(0; 0; 0)

Оценки весов критериев

i	j	M	w_{ij}	\underline{w}_i	\overline{W}_i
1	1	Умеренный	0,2; 0,4; 0,6	0,27; 0,47; 0,67	0,06; 0,15; 0,37
	2	Высокий	0,4; 0,6; 0,8		
	3	Умеренный	0,2; 0,4; 0,6		
2	1	Высокий	0,4; 0,6; 0,8	0,27; 0,47; 0,67	0,06; 0,15; 0,37
	2	Умеренный	0,2; 0,4; 0,6		
	3	»	0,2; 0,4; 0,6		
3	1	Низкий	0; 0,2; 0,4	0,07; 0,27; 0,47	0,01; 0,08; 0,26
	2	»	0; 0,2; 0,4		
	3	Умеренный	0,2; 0,4; 0,6		
4	1	Умеренный	0,2; 0,4; 0,6	0,20; 0,40; 0,60	0,04; 0,13; 0,33
	2	»	0,2; 0,4; 0,6		
	3	»	0,2; 0,4; 0,6		
5	1	Умеренный	0,2; 0,4; 0,6	0,27; 0,47; 0,67	0,06; 0,15; 0,37
	2	Высокий	0,4; 0,6; 0,8		
	3	Умеренный	0,2; 0,4; 0,6		
6	1	Высокий	0,4; 0,6; 0,8	0,40; 0,60; 0,80	0,09; 0,19; 0,44
	2	»	0,4; 0,6; 0,8		
	3	»	0,4; 0,6; 0,8		
7	1	Высокий	0,4; 0,6; 0,8	0,33; 0,53; 0,73	0,07; 0,17; 0,41
	2	Умеренный	0,2; 0,4; 0,6		
	3	Высокий	0,4; 0,6; 0,8		

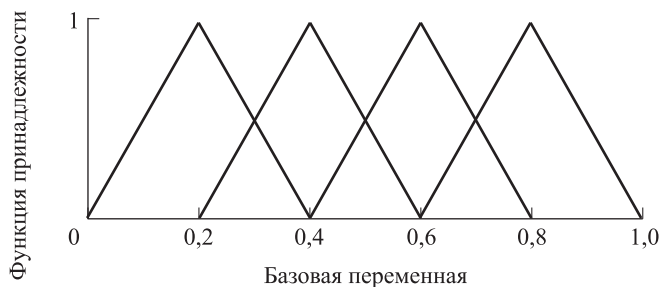


Рис. 2. Функции принадлежности терм-множества лингвистических оценок весов критериев

В табл. 5 подсчитаны комплексные оценки негативного воздействия каждой k -й технологии в соответствии с шагом 6 алгоритма, описанного ранее.

Таблица 5

Комплексные оценки негативного воздействия

<i>i</i>	<i>k</i>	1	2	3	4
1	$W_i N_{ki}$	0,04; 0,12; 0,39	0,05; 0,15; 0,44	0,02; 0,08; 0,30	0,01; 0,06; 0,22
2	$W_i N_{ki}$	0,01; 0,04; 0,22	0,00; 0,02; 0,09	0,00; 0,11; 1,02	0,02; 0,15; 1,08
3	$W_i N_{ki}$	0,00; 0,06; 0,47	0,00; 0,02; 0,18	0,01; 0,08; 0,64	0,00; 0,06; 0,61
4	$W_i N_{ki}$	0,00; 0,00; 0,03	0,00; 0,00; 0,00	0,00; 0,13; 4,33	0,01; 0,13; 3,71
5	$W_i N_{ki}$	0,01; 0,03; 0,17	0,00; 0,00; 0,00	0,01; 0,10; 1,03	0,02; 0,15; 1,35
6	$W_i N_{ki}$	0,00; 0,00; 0,00	0,00; 0,00; 0,00	0,04; 0,19; 0,97	0,01; 0,16; 1,02
7	$W_i N_{ki}$	0,00; 0,00; 0,00	0,00; 0,00; 0,00	0,04; 0,17; 0,74	0,00; 0,00; 0,00
N_k		0,06; 0,26; 1,29	0,05; 0,19; 0,71	0,12; 0,85; 9,04	0,08; 0,70; 7,99

Идеальное решение определено как

$$N^+ = (N^{+\min}, N^{+\text{pos}}, N^{+\max}) = (0; 0; 0).$$

Отрицательное идеальное решение определено как вариант с наихудшими (максимальными) значениями потоков N_i по каждому критерию (выделены в табл. 3) с учетом их весов:

$$N^- = (N^{-\min}, N^{-\text{pos}}, N^{-\max}) = (0,17; 1,00; 9,56).$$

Расстояния комплексной оценки каждой технологии от идеального решения $d(N_k, N^+)$ и отрицательного идеального решения $d(N_k, N^-)$, а также коэффициенты близости CC_k представлены в табл. 6.

Таблица 6

Расстояния от идеального и отрицательного идеального решений, коэффициенты близости

<i>k</i>	1	2	3	4
$d(N_k, N^+)$	0,76	0,42	5,24	4,63
$d(N_k, N^-)$	4,80	5,13	0,31	0,93
CC_k	0,86	0,92	0,06	0,17

В результате установлено, что наилучшей альтернативой является технология № 2.

Заключение. Для промышленных объектов, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду, внедрение принципов НДТ является ключевым элементом экологической стратегии, которую составляют стратегические решения, определяющие природоохранную деятельность предприятия [36]. Рассмотрена проблема определения наилучшей альтернативы НДТ. Выбор НДТ осложняется наличием многочисленных критериев, по которым нет явных предпочтений в отношении какой-либо технологии; отсутствием точных данных о характеристиках и потенциальных воздействиях технологий на окружающую среду и необходимостью прибегать к экспертной оценке.

Для данной проблемы обосновано представление значений параметров в виде нечетких чисел, предложены нечеткий вариант метода линейного масштабирования, метод агрегирования экспертных оценок, произведенных в терминах лингвистических переменных, и нечеткий вариант метода TOPSIS.

На стадиях процесса выбора НДТ возникают сложные, плохо формализуемые задачи, описываемые неоднозначными характеристиками, но на практике методы нечетких множеств используются довольно редко. Иллюстрация работы разработанного метода на реальном примере свидетельствует о его эффективности и способности обеспечить объективное принятие решений при определении НДТ в конфликтных ситуациях. В настоящей статье решена задача оценки альтернативных технологий по уровням негативного воздействия на окружающую среду с точки зрения значимости входных и выходных потоков. В продолжение исследования будут выполнены работы по дальнейшему развитию нечетких методов решения для других этапов процедуры определения НДТ, в частности для оценки экономической эффективности внедрения и эксплуатации НДТ, а также методов оценки значимости (информативности) входных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Красс М.С.* Модель связей в системе экология–жизнедеятельность человека // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012. № 1. С. 74–92.
2. *Федеральный закон Российской Федерации от 21 июля 2014 г. № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации».*
3. *Волков В.И.* Методика экспертной оценки проектов инновационной направленности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2004. № 3. С. 100–113.
4. *BREF economics and cross-media effects.*
URL: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/ecm.html> (дата обращения 10.05.2016).
5. *Клейнер Г.Б.* Экономико-математическое моделирование и экономическая теория // Экономика и математические методы. 2001. Т. 37. № 3. С. 111–126.
6. *Панова С.А., Тишаева И.Р.* Системная модель наилучшей доступной технологии // Вестник МИТХТ. 2014. Т. 9. № 5. С. 83–85.
7. *Журавель Н.М.* Экспертная система оценки эколого-экономической эффективности наилучших доступных технологий при совершенствовании природопользования Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 3. № 1. С. 95–99.
8. *Иванушкин С.В., Чечеватова О.Ю.* Методический подход к определению отечественных наилучших доступных технологий // Изв. Института инженерной физики. 2015. Т. 2. № 36. С. 77–79.
9. *Giner-Santonja G., Aragonés-Beltrán P., Niclós-Ferragut J.* The application of the analytic network process to the assessment of best available techniques // Journal of Cleaner Production. 2012. Vol. 25. P. 86–95. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.12.012

10. *Belton V., Stewart T.* Multiple criteria decision analysis. An integrated approach. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2002. 372 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-1495-4
11. *Huang I.B., Keisler J., Linkov I.* Multi-criteria decision analysis in environmental science: ten years of applications and trends // *Science of the Total Environment*. 2011. Vol. 409. No. 19. P. 3578–3594. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.06.022
12. *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. Vol. 70. P. 259–281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.01.082
13. *Bréchet 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. No. 5. P. 1790–1801. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.11.012
14. *Птускин А.С.* Нечеткие модели и методы в менеджменте. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 216 с.
15. *Левнер Е.В., Птускин А.С., Фридман А.А.* Размытые множества и их применение. М.: ЦЭМИ РАН, 1998. 108 с.
16. *Птускин А.С.* Решение стратегических задач в условиях размытой информации. М.: ИТК «Дашков и К^о», 2003. 240 с.
17. *Орлов А.И., Луценко Е.В.* Системная нечеткая интервальная математика. Краснодар: КубГАУ, 2014. 600 с.
18. *Cengiz K.* Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments. Springer, 2008. 591 p. DOI: 10.1007/978-0-387-76813-7
19. *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. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.058
20. *Wang J.J., Jing Y.Y., Zhang C.F., Zhao J.H.* Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009. Vol. 13. No. 9. P. 2263–2278. DOI: 10.1016/j.rser.2009.06.021
21. *Baysal M.E., Sarucan A., Kahraman C., Engin O.* The selection of renewable energy power plant technology using fuzzy data envelopment analysis // *Proceedings of the 2011 World Congress on Engineering*. 2011. P. 1140–1143.
22. *Bonano E.J., Apostolakis G.E., Salter P.F., Ghassemi A., Jennings S.* Application of risk assessment and decision analysis to the evaluation, ranking and selection of environmental remediation alternatives // *J. Hazard. Mater.* 2000. Vol. 71. No. 1-3. P. 35–57. DOI: 10.1016/S0304-3894(99)00071-0
23. *Chowdhury S., Husain T.* Evaluation of drinking water treatment technology: an entropy-based fuzzy application // *J. Environ. Eng.* 2006. Vol. 132. No. 10. P. 1264–1271. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:10(1264)
24. *Geldermann J., Rentz O.* Integrated technique assessment with imprecise information as a support for the determination of best available techniques (BAT) // *Spektrum*. 2001. Vol. 23. No. 1. P. 137–157. DOI: 10.1007/PL00013341
25. *Krajnc D., Mele M., Glavic P.* Fuzzy logic model for the performance benchmarking of sugar plants by considering best available techniques // *Resour. Conserv. Recycl.* 2007. Vol. 52. No. 2. P. 314–330. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.05.001

26. *Lin G.T.R., Shen Y.C.* A collaborative model for technology evaluation and decision-making // *J. Sci. Indus. Res.* 2010. Vol. 69. No. 2. P. 94–100.
27. *Prabhu T.R., Vizayakumar K.* Technology choice using FHDМ: a case of ironmaking technology // *IEEE Trans. Eng. Manag.* 2001. Vol. 48. No. 2. P. 209–222.
DOI: 10.1109/17.922479
28. *Sadiq R., Khan F.I., Veitch B.* Evaluating offshore technologies for produced water management using GreenPro-I: a risk-based life cycle analysis for green and clean process selection and design // *Comput. Chem. Eng.* 2005. Vol. 29. No. 5. P. 1023–1039.
DOI: 10.1016/j.compchemeng.2004.11.003
29. *Wang J.J., Jing Y.Y., Zhang C.F., Shi G.H., Zhang X.T.* A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system // *Energy Policy.* 2008. Vol. 36. No. 10. P. 3823–3832.
DOI: 10.1016/j.enpol.2008.07.002
30. *ГОСТ Р 54097–2010.* Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации. 2012.
31. *Птускин А.С.* Задача бюджетирования капитала с размытыми параметрами // *Экономика и математические методы.* 2005. Т. 41. № 2. С. 95–101.
32. *Hwang C.L., Yoon K.* Multiple attributes decision making methods and applications. Heidelberg, Berlin: Springer, 1981. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9
33. *Chen C.-T.* Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment // *Fuzzy sets and systems.* 2000. Vol. 114. No. 1. P. 1–9. DOI:10.1016/S0165-0114(97)00377-1
34. *Орлов А.И.* Эконометрика. М.: Изд-во «Экзамен», 2002. 576 с.
35. *Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 7–2015.* Производство извести. М.: Бюро НДТ, 2015. 125 с.
36. *Коржавый А.П., Птускин А.С.* Иерархическая структура экологической стратегии промышленного предприятия // *Контроллинг.* 2015. Т. 55. № 1. С. 62–69.

Птускин Александр Соломонович — д-р экон. наук, профессор кафедры «Экономика и организация производств» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2).

Левнер Евгений — д-р философии, профессор Ашкелонского Академического колледжа (ул. Бен-цви 12, Ашкелон, 78211 Израиль).

Жукова Юлия Михайловна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная экология и химия» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Птускин А.С., Левнер Е., Жукова Ю.М. Многокритериальная модель определения наилучшей доступной технологии при нечетких исходных данных // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение.* 2016. № 6. С. 105–127.

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-105-127

A MULTI-CRITERIA MODEL OF DETERMINING THE BEST AVAILABLE TECHNOLOGY UNDER FUZZY INPUT DATA

A.S. Ptuskin¹

E.V. Levner²

Yu.M. Zhukova¹

aptuskin@mail.ru

eli_levner@bezeqint.net

dazhfl@mail.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation

² Ashkelon Academic College, Ashkelon, Israel

Abstract

One of the key elements in solving environment-protection problems is introducing the principles of the best available technologies, which are effective in evaluating and regulating the negative impact industrial plants have on the environment. The term “best available technologies” (BAT) are defined as the production technologies, processes and services, determined on the basis of modern science and technology, with the best combination of criteria to achieve environmental objectives subject to availability of technical possibilities being taken into account. The problem of selecting the best available technologies is based on the valuation of pollution and counter-pollution measures and the regulation of the negative impact of industrial production on the environment. Comparing alternative technological options is a complex task in which many environmental, technological, economic and social criteria should be taken into account. One of the main conditions for the correct selection of tools for decision-making on BAT is to adequately address uncertain input data. For the correct assessment of alternative technologies including comparison of the levels of negative impacts on the environment, we propose a model of multi-criteria decision making with fuzzy parameters which is a variant of the fuzzy multicriteria decision making methodology called TOPSIS. A stepwise algorithm for multi-criteria decision-making is developed that allows us to operate with uncertain, fuzzy input data using subjective expert evaluations. The proposed method is illustrated with a real-life example which verifies and justifies the method, and illustrates its effectiveness and ability to provide an objective decision-making solution

Keywords

Ecology, best available technology, environmental and economic models, multi-criteria decision making, fuzzy sets theory

REFERENCES

- [1] Krass M.S. Model of connections in the ecology–human vital activity system. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural Sciences], 2012, no. 1, pp. 74–92 (in Russ.).
- [2] Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 21 iyulya 2014 g. № 219-FZ "O vnesenii izmeneniy v Federal'nyy zakon "Ob okhrane okruzhayushchey sredy" i ot del'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii" [Federal law of the Russian Federation dated July 21,

2014 No. 219-FZ "On amendments to the federal law on environmental protection" and certain legislative acts of the Russian Federation"].

[3] Volkov V.I. Procedure of expert estimation of projects with innovation trend. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering], 2004, no. 3, pp. 100–113 (in Russ.).

[4] BREF economics and cross-media effects. URL: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/ecm.html> (accessed 10.05.2016)

[5] Kleiner G.B. Economic and mathematical methods and economic theory. *Ekonomika i matematicheskie metody*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 111–126 (in Russ.).

[6] Panova S.A., Tishaeva I.R. System model for identification of the best available technology (BAT). *Vestnik MITHT*, 2014, vol. 9, no. 5, pp. 83–85 (in Russ.).

[7] Zhuravel N.M. Expert system for the environmental and economic efficiency of best available technology in improving the exploitation of natural resources in Siberia. *Interexpo Geo-Sibir* [Interexpo Geo-Siberia], 2014, vol. 3, no. 1, pp. 95–99 (in Russ.).

[8] Ivanushkin S.V., Chechevatova O.U. The methodical approach to the definition of domestic best available technologies. *Izvestiya Instituta Inzhenernoy Phiziki*, 2015, vol. 2, no. 36, pp. 77–79 (in Russ.).

[9] Giner-Santonja G., Aragonés-Beltrán P., Niclós-Ferragut J. The application of the analytic network process to the assessment of best available techniques. *Journal of Cleaner Production*, 2012, vol. 25, pp. 86–95. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.12.012

[10] Belton V., Stewart T. Multiple criteria decision analysis. An integrated approach. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2002. 372 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-1495-4

[11] Huang I.B., Keisler J., Linkov I. Multi-criteria decision analysis in environmental science: ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*, 2011, vol. 409, no. 19, pp. 3578–3594. DOI:10.1016/j.scitotenv.2011.06.022

[12] 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, vol. 70, pp. 259–281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.01.082

[13] Bréchet 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, no. 5, pp. 1790–1801. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.11.012

[14] Ptuskin A.S. Nechetkie modeli i metody v menedjmente [Fuzzy models and methods in management]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 216 p.

[15] Levner E.V., Ptuskin A.S., Friedman A.A. Razmytye mnozhestva i ih primenenie [Fuzzy sets and their applications]. Moscow, CEMI RSS Publ., 1998. 108 p.

[16] Ptuskin A.S. Reshenie strategicheskikh zadach v usloviyah razmytoy informacii [The solution of strategic problems in conditions of fuzzy information]. Moscow, Dashkov & K Publ., 2003. 240 p.

[17] Orlov A.I., Lucenko E.V. Sistemnaya nechetkaya intervalnaya matematika [Systemic interval fuzzy mathematic]. Krasnodar, KubSAU Publ., 2014. 600 p.

- [18] Cengiz K. Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments. Springer, 2008. 591 p. DOI: 10.1007/978-0-387-76813-7
- [19] Herva M., Roca E. Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 2013, vol. 39, pp. 355–371. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.058
- [20] Wang J.J., Jing Y.Y., Zhang C.F., Zhao J.H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2009, vol. 13, no. 9, pp. 2263–2278. DOI: 10.1016/j.rser.2009.06.021
- [21] Baysal M.E., Sarucan A., Kahraman C., Engin O. The selection of renewable energy power plant technology using fuzzy data envelopment analysis. *Proceedings of the 2011 World Congress on Engineering*, 2011, pp. 1140–1143.
- [22] Bonano E.J., Apostolakis G.E., Salter P.F., Ghassemi A., Jennings S. Application of risk assessment and decision analysis to the evaluation, ranking and selection of environmental remediation alternatives. *J. Hazard. Mater.*, 2000, vol. 71, no. 1-3, pp. 35–57. DOI: 10.1016/S0304-3894(99)00071-0
- [23] Chowdhury S., Husain T. Evaluation of drinking water treatment technology: an entropy-based fuzzy application. *J. Environ. Eng.*, 2006, vol. 132, no. 10, pp. 1264–1271. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:10(1264)
- [24] Geldermann J., Rentz O. Integrated technique assessment with imprecise information as a support for the determination of best available techniques (BAT). *Spektrum*, 2001, vol. 23, no. 1, pp. 137–157. DOI: 10.1007/PL00013341
- [25] Krajnc D., Mele M., Glavic P. Fuzzy logic model for the performance benchmarking of sugar plants by considering best available techniques. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2007, vol. 52, no. 2, pp. 314–330. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.05.001
- [26] Lin G.T.R., Shen Y.C. A collaborative model for technology evaluation and decision-making. *J. Sci. Indus. Res.*, 2010, vol. 69, no. 2, pp. 94–100.
- [27] Prabhu T.R., Vizayakumar K. Technology choice using FHDM: a case of iron-making technology. *IEEE Trans. Eng. Manag.*, 2001, vol. 48, no. 2, pp. 209–222. DOI: 10.1109/17.922479
- [28] Sadiq R., Khan F.I., Veitch B. Evaluating offshore technologies for produced water management using GreenPro-I: a risk-based life cycle analysis for green and clean process selection and design. *Comput. Chem. Eng.*, 2005, vol. 29, no. 5, pp. 1023–1039. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2004.11.003
- [29] Wang J.J., Jing Y.Y., Zhang C.F., Shi G.H., Zhang X.T. A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. *Energy Policy*, 2008, vol. 36, no. 10, pp. 3823–3832. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.07.002
- [30] GOST R 54097–2010. Resursosberezhenie. Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Metodologiya identifikatsii. [State standard R 54097-2010. Resources saving. Best available techniques. Identification methodology]. 2012.
- [31] Ptuskin A.S. A problem of capital budgeting with fuzzy sets. *Ekonomika i matematicheskie metody*, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 95–101 (in Russ.).
- [32] Hwang C.L., Yoon K. Multiple attributes decision making methods and applications. Heidelberg, Berlin, Springer, 1981. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9

[33] Chen C.-T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, vol. 114, no. 1, pp. 1–9.

DOI:10.1016/S0165-0114(97)00377-1

[34] Orlov A.I. *Econometrika [Econometrics]*. Moscow, Examen Publ., 2002. 576 p.

[35] Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ITS 7–2015. Производство извести [Information and technical reference for the best available techniques. ITS 7–2015. Manufacture of lime]. Moscow, Byuro NDT, 2015. 125 p.

[36] Korzhavy A.P., Ptuskin A.S. Hierarchical structure of the environmental strategy of the industrial enterprise. *Kontrolling*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 62–69.

Ptuskin A.S. — Dr. Sci. (Econ.), Professor of Economics and Management of Enterprise Department, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch (Bazhenova ul. 2, Kaluga, 248000 Russian Federation).

Levner E. — PhD, Professor of Ashkelon Academic College (Ben Zvi St. 12, Ashkelon, 78211 Israel).

Zhukova Ju.M. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Industrial Ecology and Chemistry Department, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch (Bazhenova ul. 2, Kaluga, 248000 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ptuskin A.S., Levner E., Zhukova Yu.M. A Multi-Criteria Model of Determining the Best Available Technology under Fuzzy Input Data. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 6, pp. 105–127. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-105-127



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2-е издание учебного пособия
автора **А.Н. Полилова**

«Экспериментальная механика композитов»

Изложены научные основы экспериментальных исследований композитных материалов-конструкций. Обоснованы экспериментальные методы определения полного набора упругих и прочностных констант ортотропных композитов. Приведены методы исследования ползучести и высокоскоростного деформирования композитов, модели и критерии разрушения анизотропных волокнистых композитов с полимерной матрицей. Предложены энергетические критерии развития расслоений и расщеплений в композитах. Рассмотрено влияние концентрации напряжений на прочность композитных деталей. Представлены оригинальные модели разрушения композитов, а также расчетные методы, отличающиеся от стандартных.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru