

---

---

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

---

---

**Нечеткая модель выбора альтернативных операций наилучшей доступной  
технологии на уровне установки**

© 2020 г. А.С. Птускин, Ю.М. Жукова

**А.С. Птускин,**

*Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга; e-mail: aptuskin@mail.ru*

**Ю.М. Жукова,**

*Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга; e-mail: zjuliam@hotmail.com*

Поступила в редакцию 05.12.2019

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Калужской области (проект 18-410-400001).*

*Авторы благодарят С.А. Птускина за компьютерную реализацию решения задачи иллюстрационного примера. Также авторы благодарят анонимного рецензента за критические замечания.*

**Аннотация.** Рациональное природопользование составляет одно из приоритетных направлений научных исследований. Современные принципы экологического регулирования деятельности промышленных предприятий основаны на концепции наилучших доступных технологий (НДТ), т.е. эффективных новейших технологий, которые обеспечивают наиболее высокий уровень защиты окружающей среды и достигли уровня, который делает возможным их внедрение в соответствующем секторе промышленности. Актуальной задачей остается разработка и совершенствование формальных моделей и методов идентификации НДТ. Основной используемый подход состоит в сравнении заданных альтернативных технологий и выборе единственной технологии с использованием методологии многокритериального принятия решений. Концепция НДТ устанавливает не требования использовать определенную технологию, а значения допустимых эмиссий, поэтому сочетание технологий без априорного ограничения использования только одной из них может быть более эффективно. В данной работе рассматривается задача определения НДТ на уровне установки и предлагается новая модель нечеткого математического программирования, позволяющая за счет выбора сочетания операций различных технологий, включающих большое число стадий, минимизировать обобщенные эксплуатационные затраты предприятия. Уровни эмиссий и затраты, соответствующие отдельным операциям, представляются нечеткими числами. Иллюстрационный пример показывает, что использование модели приводит к выбору операций, эффективному с точки зрения экономических показателей при заданных ограничениях на размер эмиссий комбинации.

**Ключевые слова:** экология, наилучшие доступные технологии, нечеткое математическое программирование.

**Классификация JEL:** C6, O14, Q01, Q57.

**DOI:** 10.31857/S042473880012417-7

## ВВЕДЕНИЕ

Проблемы реализации стратегии устойчивого развития относятся к приоритетным направлениям научных исследований. Одним из основных принципов стратегии является ее рациональное природопользование. Производство, хранение, транспортировка, использование и захоронение продукции могут серьезно негативно воздействовать на окружающую среду в результате сбросов в водные объекты и почву загрязняющих веществ, выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, захоронения отходов, электромагнитных и других излучений, истощения природных ресурсов и т.д. (Levner, Ptuskin, 2018). В полном объеме исключить это воздействие невозможно, но его можно минимизировать за счет рациональных методов регулирования охраны окружающей среды.

В работе (Гусев, 2015) справедливо утверждается, что «построение механизма достижения паритета между экономическими и экологическими ценностями общества базируется на формировании инструментов стимулирования снижения антропогенной нагрузки на природу, создании условий

экономически выгодной природоохранной деятельности и целевой государственной поддержке охраны природы». Поэтому крайне важно применять практику экологического регулирования, способствующую развитию инновационных «зеленых» технологий, вызывающих положительные внешние эффекты в виде улучшения качества окружающей среды (Sbardella, Perruchas et al., 2018). Современные методы экологического регулирования основаны на *концепции наилучших доступных технологий* (НДТ).

Стандарт ГОСТ Р 54097–2010 «Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации» определяет *наилучшие доступные технологии* (НДТ) как «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». Идея использования НДТ заключается в том, что для действующих производств разрешенные уровни эмиссий должны быть установлены на основе наилучших доступных технологий в данной отрасли производства. НДТ определяет предельные значения эмиссий в окружающую среду без предписания использовать конкретную технологию, но с учетом технических характеристик установки, ее географического положения и местных природных условий. Использование соответствующих НДТ экологических норм является действенным инструментом, он позволяет снизить негативные экологические воздействия и гарантировать высокий уровень защиты окружающей среды.

Серьезной проблемой является идентификация НДТ и соответствующих им показателей. Методология решения этой проблемы определена в документе (BREF, 2006), но во многих случаях она не обеспечивает однозначного выбора альтернативного решения. Обычно на признание наилучшей претендуют несколько технологий, не имеющих очевидных преимуществ по всем характеристикам. Их сравнение является сложной задачей, требующей учета большого числа критериев, различных видов воздействий на окружающую среду, локальных проблем, экспертных оценок. Поэтому здесь особенно актуально утверждение работы (Клейнер, 2001) о необходимости расширения арсенала инструментальных и математических средств моделирования как одного из основных направлений повышения качества экономических и математических моделей и их эффективности. Однако формальных инструментов для каждого этапа процесса принятия решений по определению НДТ не существует и проблема их разработки и совершенствования остается актуальной задачей (Evrard, Villot, Armiaou et al., 2018). Этапами этого процесса являются: выбор критериев оценки → сбор информации и данных → получение устойчивых индикаторов → нормализация показателей → критерии взвешивания → сравнение вариантов и выбор наилучшей альтернативы → анализ чувствительности (Ibáñez-Forés, Bovea, Pérez-Belis, 2014). В данной работе предлагается модель для ключевого этапа сравнения вариантов и выбора наилучшей альтернативы.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В работе (Evrard et al., 2016) показано, что методы идентификации НДТ существуют на двух уровнях: 1) промышленного сектора; 2) установки. Понятие «установка» относится к любому стационарному техническому или другому объекту, деятельность которого способна повлиять на эмиссии и загрязнение. Применению НДТ на уровне установки посвящены, например, следующие работы (Bréchet, Tulkens, 2009; Rodríguez et al., 2011; Giner-Santonja et al., 2012; Bortolini et al., 2013; Cikankowitz, Laforest, 2013; Ibáñez-Forés, Andrade et al., 2013; Laforest, 2014; Nguyen, Dawal et al., 2014).

В работе (Ibáñez-Forés et al., 2014) представлен обзор математических методов, разработанных для определения НДТ. Основной подход состоит в сравнении заданных альтернативных технологий с использованием методологии многокритериального принятия решений: AHP/ANP, TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE, метод взвешенной суммы критериев (Weighted Sum Method), — в небольшом числе публикаций предложены модели многокритериального математического программирования, например в (Mavrotas, Georgopoulou, Mirasgedis et al., 2007; García, Caballero, 2011).

Для определения соответствующих альтернативным вариантам уровней эмиссий и оценки эксплуатационных затрат необходимо проанализировать большой объем информации (Samarakoon, Gudmestad, 2011). Систематизировать такие данные достаточно сложно, и это — серьезная проблема при реализации концепции НДТ (Bréchet, Tulkens, 2009). Определение уровней выбросов в значительной степени зависит от экспертных оценок (Polders, Van den Abeele et al., 2012), в каждом частном случае необходимо учитывать местные условия. Поэтому значения уровней эмиссий технологических процессов не могут быть заданы однозначно, справочники определяют диапазоны, присущие наилучшим доступным технологиям. Работа (Herva, Roca, 2013) обосновывает для выбора НДТ продуктивность использования аппарата теории нечетких множеств. Среди немногочисленных исследований, развивающих этот подход

с использованием методологии многокритериального принятия решений, можно указать, например, (Wang, Jing et al., 2009; Bonano, Apostolakis et al., 2001; Lin, Shen, 2010; Птускин, Левнер, Жукова, 2016).

В публикациях, предлагающих модели выбора НДТ, определяется единственная технология из имеющихся альтернатив. Однако с точки зрения общей методологии оценки НДТ возможно сочетание технологий, что может быть эффективно в экономическом плане. Поэтому рационально определение наилучшей комбинации операции различных технологий без априорного ограничения пользования только одной технологией (Bréchet, Tulkens, 2009). Справочники НДТ не устанавливают требования применять определенную технологию, в них указаны уровни допустимых эмиссий, диапазон возможных значений технологических нормативов. В работе (Bréchet, Tulkens, 2009) на примере производства извести для гипотетической установки, включающей карьер с камнедробильной станцией (этап 1 технологии) и печь заданной мощности (этап 2 технологии), предложена модель, которая реализует оптимальный выбор из вариантов этих этапов и предусматривает два сценария: минимизация частных затрат и минимизация обобщенных затрат (частные расходы плюс внешние затраты). Авторы показали, что, как правило, не существует ни одной наилучшей доступной технологии, а скорее существует наилучшая комбинация доступных технологий. В работе (Птускин, Жукова, 2019) предложен упрощенный вариант определения НДТ из набора допустимых технологий, операции которых могут иметь альтернативные варианты, предлагающий перебор различных вариантов.

В настоящей работе исследуется проблема применения НДТ на уровне установки и предлагается оригинальная модель нечеткого математического программирования, позволяющая за счет комбинации операций различных технологий, включающих большое число стадий, минимизировать эксплуатационные затраты предприятия. Уровни эмиссий и затраты, соответствующие отдельным операциям, представляются нечеткими числами. Арифметические операции с нечеткими числами приведены ниже.

Нечеткое математическое программирование развивается для обработки неопределенностей в оптимизационных задачах. Модели, в отличие от моделей классического математического программирования, включают нечеткие параметры и с точки зрения трактовки неопределенности могут быть классифицированы по различным категориям (Inuiguchi, Ramk, 2000). Предлагаемая в данной работе модель относится к категории нечеткого математического программирования, которая представляет собой задачи с нечеткими коэффициентами целевой функции и ограничений. Впервые такие модели исследованы в работах (Dubois, Prade, 1980; Tanaka, Asai, 1984; Orlovsky, 1984; Ramik, Rimanek, 1985). Этот тип нечеткого математического программирования, получивший широкое развитие, обычно называют *программированием возможностей*.

## МОДЕЛЬ ВЫБОРА ОПЕРАЦИЙ

Постановка задачи состоит в следующем. Имеется НДТ, определяющая разрешенные уровни эмиссий, но на некоторых стадиях технологии возможны альтернативные варианты операций. Подобную ситуацию иллюстрирует рис. 1. На стадии  $j$  существуют три альтернативные операции, отличающиеся уровнями негативного воздействия на окружающую среду и эксплуатационными затратами.

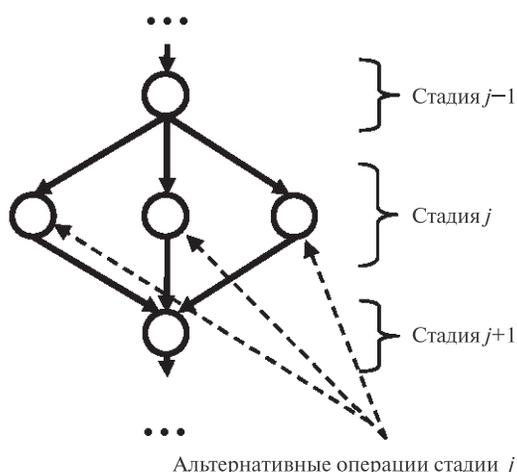


Рис. 1. Варианты реализации стадии технологического процесса

Эксплуатационные затраты и уровни эмиссий определены для каждой операции. Как указано в справочном документе (BREF, 2006), установить необходимые значения этих параметров можно из данных мониторинга на существующих производствах, экспериментальных данных, расчетных данных, данных от производителей оборудования. Эксплуатационные затраты включают затраты на энергоносители, затраты на материалы и услуги, затраты на оплату труда, расходы на ремонт и т.д. (BREF, 2006). Амортизационные отчисления отражают капитальные затраты; косвенные затраты не учитываются. Метод определения значений параметров затрат и эмиссий, необходимых для процедуры выявления НДТ, представлен в работе (Птускин, 2018).

Этот метод пригоден для практического установления необходимых уровней затрат и эмиссий технологами и экономистами предприятий.

Схему технологического процесса можно представить в виде ориентированного графа, вершины которого соответствуют отдельным операциям, причем вершины, находящиеся на одинаковом расстоянии от исходной вершины, соответствуют альтернативным вариантам операций, принадлежащим одной стадии технологии. Задача состоит в том, чтобы выбрать оптимальный маршрут, который составляют операции с минимальной суммой затрат и суммарным уровнем эмиссий, не превышающим заданный допустимый уровень. Соответствие действующим нормам является необходимым и достаточным условием для выбора технологии.

Мы представляем уровни эмиссий и затрат нечеткими числами. Объективная процедура фазификации параметров операций представлена в работе (Птускин, 2018).

Введем следующие обозначения:  $n$  — число стадий технологического процесса;  $j$  — номер стадии технологического процесса;  $j = 1, \dots, n$ ;  $m$  — число возможных операций технологического процесса;  $i$  — номер операции технологического процесса;  $i = 1, \dots, m$ ;  $b(i, j)$  — параметр, определяющий принадлежность операции  $i$  стадии  $j$ :  $b(i, j) = 1$ , если операция  $i$  принадлежит стадии  $j$ ;  $b(i, j) = 0$ , если операция  $i$  не принадлежит стадии  $j$ ;  $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, n$ ;  $s(i)$  — заданные нечетким числом эксплуатационные затраты операции  $i$ ;  $k$  — число контролируемых эмиссий технологического процесса;  $l$  — номер контролируемой эмиссии технологического процесса,  $l = 1, \dots, k$ ;  $a(i, l)$  — заданная нечетким числом величина уровня контролируемой эмиссии  $l$ , соответствующего операции  $i$ ;  $i = 1, \dots, m$ ;  $l = 1, \dots, k$ ;  $A(l)$  — предельное значение уровня суммарной контролируемой эмиссии  $l$  по всему технологическому процессу;  $l = 1, \dots, k$ ;  $x(i)$  — переменная, принимающая для каждой операции значения:  $x(i) = 1$ , если операция  $i$  включена в комбинированный технологический процесс, или  $x(i) = 0$ , если операция  $i$  не включена в комбинированный технологический процесс;  $i = 1, \dots, m$ .

Модель выбора операций можно представить в виде блочной задачи математического программирования рюкзачного типа с нечеткими переменными. Целевая функция, минимизирующая суммарные эксплуатационные затраты операций, включенных в комбинированный технологический процесс, определяется следующим образом:

$$\sum_{i=1, \dots, m} s(i)x(i) \rightarrow \min. \tag{1}$$

Ограничения по предельным значениям суммарных контролируемых эмиссий:

$$\sum_{i=1, \dots, m} a(i, l)x(i) \leq A(l), \quad l=1, \dots, k. \tag{2}$$

Ограничения по включению только одного варианта операций на каждой стадии технологического процесса:

$$\sum_{i=1, \dots, m} b(i, j)x(i) = 1, \quad j=1, \dots, n. \tag{3}$$

В случае когда на стадии  $j$  каждый альтернативный вариант включает только одну операцию, как это показано на рис. 1, параметр  $b(i, j)$  может принимать значения 0 или 1. Алгоритм определения параметра несколько усложняется, когда альтернативный вариант включает несколько операций (рис. 2). В этом случае предлагается следующая процедура. Пусть число операций какого-либо варианта стадии  $j$  равно  $p$ . Тогда параметр каждой операции, кроме последней, имеет вид  $b(l, j) = (1/p) \times random$ ;  $l=1, \dots, p-1$ , а для последней операции —  $b(p, j) = 1 - \sum_{l=1, \dots, p-1} b(l, j)$ , где  $random$  — случайное число в интервале  $[0, 1]$  с точностью  $d$  знаков.

Для следующей альтернативной ветви процедура повторяется, но с точностью  $d = d + 1$  знаков. Это гарантирует, что в оптимальный маршрут на каждой стадии  $j = 1, \dots, n$  будут включены все

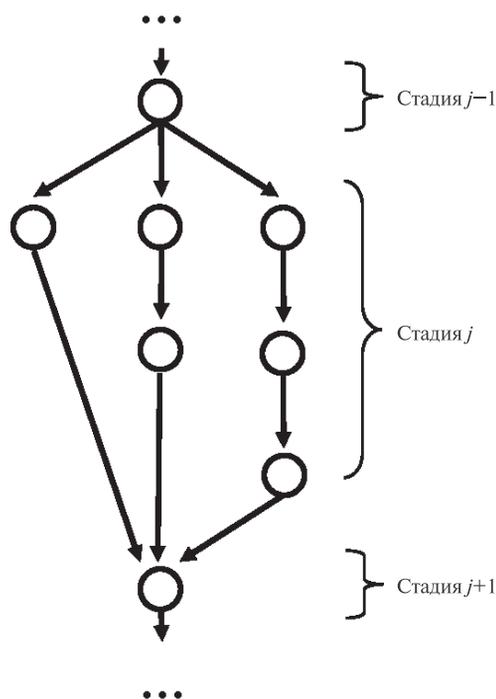


Рис. 2. Стадия технологического процесса с несколькими операциями альтернативных вариантов

операции только одной ветви, и никакие комбинации операций из разных ветвей не дадут суммарного значения  $\sum_{i=1, \dots, m} b(i, j)x(i)$ , равного 1.

Задача состоит в том, чтобы определить все  $x(i); i = 1, \dots, m$ , обеспечивающие выполнение условий (1)–(3).

Пусть  $A, B$  — нечеткие числа с функциями принадлежности  $\mu_A(x), \mu_B(x)$ ;  $c$  — обычное число. Носитель нечеткого числа  $A$  определяется как  $Supp A = \{x | \mu_A(x) > 0\}$ .

Нечеткое число  $A$  называется *положительным*, если все  $x \in Supp A$  положительны, и *отрицательным*, если все  $x \in Supp A$  отрицательны;  $Supp A$  — носитель нечеткого числа. Для положительных нечетких чисел основные арифметические операции определяются следующим образом (Левнер, Птускин, Фридман, 1998):

$$\begin{aligned} \mu_{A+B}(x) &= \max_{x_1+x_2=x} \min(\mu_A(x_1), \mu_B(x_2)), & \mu_{A-B}(x) &= \max_{x_1-x_2=x} \min(\mu_A(x_1), \mu_B(x_2)), \\ \mu_{A \times B}(x) &= \max_{x_1 \times x_2=x} \min(\mu_A(x_1), \mu_B(x_2)), & \mu_{A:B}(x) &= \max_{x_1:x_2=x} \min(\mu_A(x_1), \mu_B(x_2)), & \mu_{A \times c}(x) &= \mu_A(x:c). \end{aligned}$$

Для операции «больше или равно» используется расстояние от 0 до нечеткого числа  $A$  (Lin, Yao, 2001):  $d(A, 0) = 0,5 \int_0^1 [A_L(\alpha) + A_R(\alpha)] d\alpha$ , где  $A_L(\alpha)$  и  $A_R(\alpha)$  — соответственно левая и правая границы интервала, определяющего множество  $\alpha$  — уровня нечеткого числа  $A$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Операцию «больше или равно» определим в виде:  $A \geq B$ , если  $d(A, 0) > d(B, 0)$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Иллюстрационный пример демонстрирует результат использования модели для выбора операций технологического процесса подготовки и нанесения защитного покрытия в гальвано-химическом производстве. Гибкие автоматические гальванические линии, объединяющие несколько процессоров, обрабатывающих детали, и роботов, транспортирующих эти детали, широко применяются в промышленности (Levner, Meyzin, Ptuskin, 1998). Стадии процесса представлены в табл. 1.

На рис. 3А показан базовый технологический процесс, соответствующий НДТ, включающий операции:

$$3 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 1 \rightarrow 9 \rightarrow 1 \rightarrow 11 \rightarrow 1 \rightarrow 13 \rightarrow 1 \rightarrow 15 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 19 \rightarrow 1 \rightarrow 22 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 26 \rightarrow 27 \rightarrow 29$$

(на рисунке операции выделены серым фоном). Однако для некоторых операций на уровне установки возможны альтернативные варианты (на рисунке изображены пунктирными линиями). Наименования операций представлены в табл. 2.

В качестве эмиссий учитываются сбросы ( $l = 1$ ) и выбросы в атмосферный воздух ( $l = 2$ ). Величины уровней эмиссий могут быть заданы в различных единицах измерения. В настоящем примере они представлены значениями экологической опасности растворов и компонентов для сбросов и значениями экологической опасности растворов и компонентов при испарении в атмосферный воздух. Значение экологической опасности определялось как отношение конечной концентрации компонента раствора в воде (эмиссий в атмосферный воздух) к его предельно допустимой концентрации в воде рыбохозяйственных водоемов (предельно допустимой концентрации атмосферного воздуха) (Виноградов, 2002). Разрешенные уровни по каждому виду эмиссий соответствуют базовому варианту. Эксплуатационные издержки заданы в руб./м<sup>2</sup>.

**Таблица 1.** Стадии подготовки и нанесения защитного покрытия

№ п/п	Стадия	№ п/п	Стадия
1	Обезжиривание	11	Нанесение металлического покрытия
2	Промывка в проточной воде	12	Промывка в непроточной воде
3	Травление	13	Промывка в проточной воде
4	Промывка в проточной воде	14	Фосфатирование
5	Снятие травильного шлама	15	Промывка в проточной воде
6	Промывка в проточной воде	16	Наполнение в хроматном растворе
7	Электрохимическое обезжиривание	17	Промывка в непроточной воде
8	Промывка в проточной воде	18	Промывка в проточной воде
9	Активация	19	Термообработка
10	Промывка в проточной воде	20	Пропитка маслами, лаками / гидрофобизирование
		21	Сушка

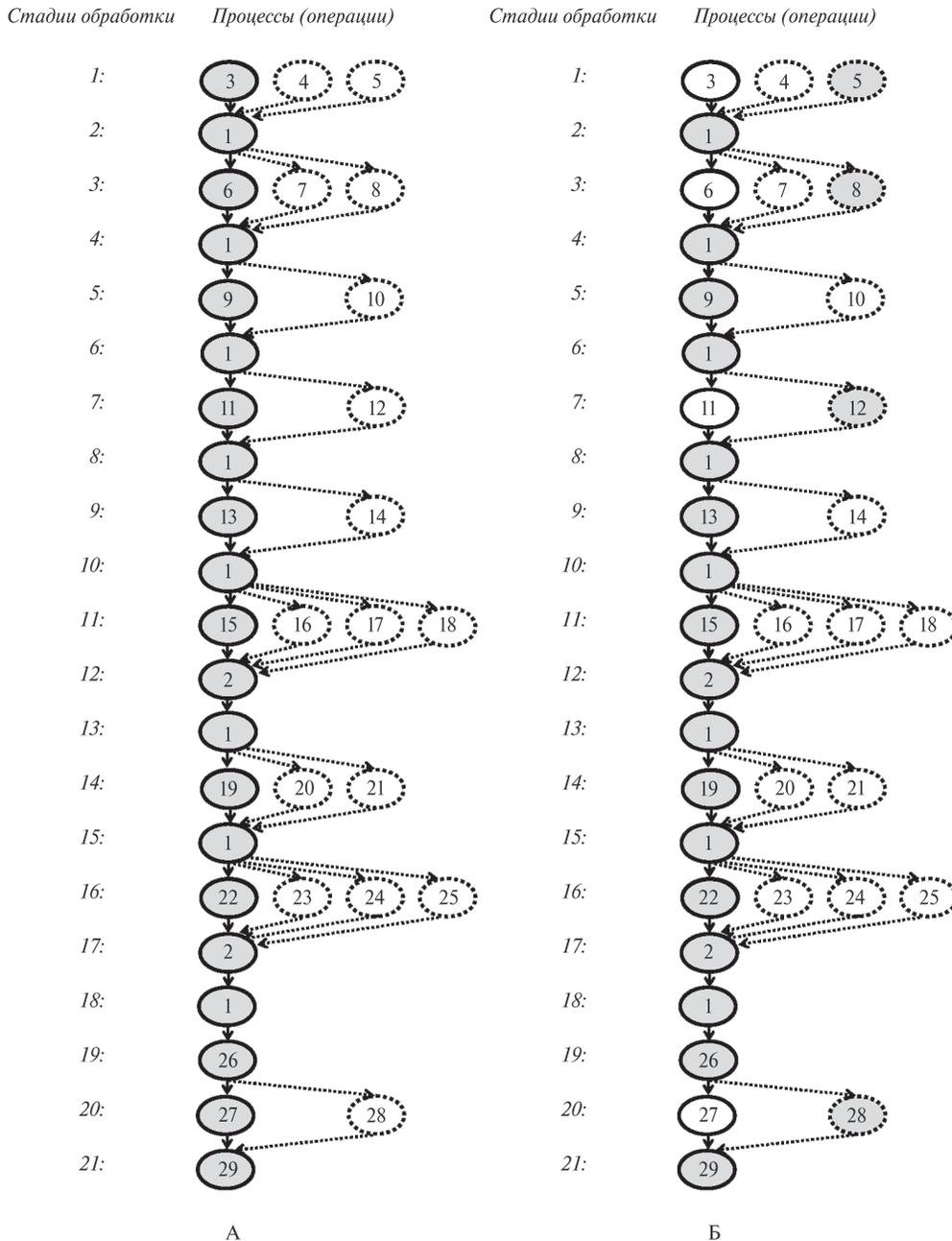


Рис. 3. Базовый технологический процесс и альтернативные операции (А) и оптимальный технологический процесс (Б)

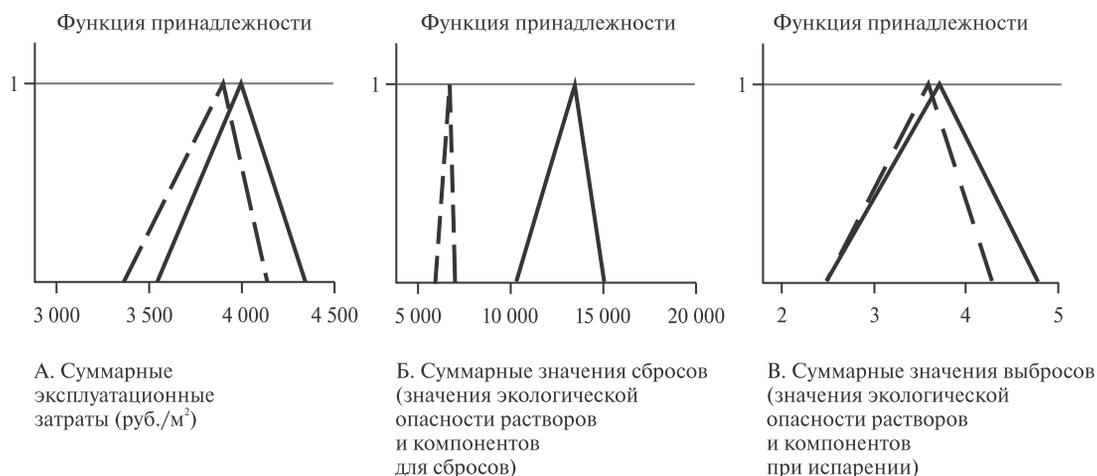
По нашему мнению, нечеткие числа с треугольными функциями принадлежности достаточно адекватно отражают неопределенность информации о затратах и эмиссиях, связанных с применением НДТ, и далее мы будем их использовать, тем более что они оказываются удобными для компьютерной реализации. Нечеткое множество  $t$  называется треугольным нечетким числом, обозначаемым  $t = (t_1, t_2, t_3)$ , если его функция принадлежности имеет вид:

$$\mu_t(y) = \begin{cases} (y - t_1) / (t_2 - t_1), & t_1 \leq y \leq t_2; \\ (t_3 - y) / (t_3 - t_2), & t_2 \leq y \leq t_3, \quad t_1 < t_2 < t_3; \\ 0 & \text{в ином случае.} \end{cases}$$

Эксплуатационные затраты для операции  $i$  определяются как нечеткое число  $s(i) = (s_1(i), s_2(i), s_3(i))$ , величина уровня контролируемой эмиссии  $l$  для операции  $i$  — как нечеткое число  $a(i, l) = (a_1(i, l), a_2(i, l), a_3(i, l))$ . Данные для иллюстрационного примера представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры операций

Операция		Эксплуатационные затраты			Сбросы, $l = 1$			Выбросы, $l = 2$		
$i$	Наименование	$s_1(i)$	$s_2(i)$	$s_3(i)$	$a_1(i, 1)$	$a_2(i, 1)$	$a_3(i, 1)$	$a_1(i, 2)$	$a_2(i, 2)$	$a_3(i, 2)$
1	Промывка в проточной воде	35	38	42	0	0	0	0	0	0
2	Промывка в непроточной воде	12	15	17	0	0	0	0	0	0
3	Обезжиривание — состав 1	225	239	245	6700	9600	10 200	0,3	0,5	0,8
4	Обезжиривание — состав 2	222	232	240	17 800	20 000	21 200	0,2	0,4	0,7
5	Обезжиривание — состав 3	212	236	248	2000	2000	2000	0,25	0,55	0,7
6	Травление — состав 1	210	242	254	800	1200	1400	0,1	0,3	0,5
7	Травление — состав 2	233	251	268	110	140	160	0,12	0,32	0,52
8	Травление — состав 3	212	233	248	900	1200	1400	0,08	0,12	0,14
9	Снятие травильного шлама — состав 1	98	112	120	1700	1700	1700	0,05	0,08	0,1
10	Снятие травильного шлама — состав 2	75	85	95	11	14	16	0,06	0,12	0,14
11	Обезжиривание электрохимическое — состав 1	200	212	220	62	80	94	0,3	0,5	0,8
12	Обезжиривание электрохимическое — состав 2	94	108	115	14	17	19	0,35	0,6	0,8
13	Активация — состав 1	100	118	125	0,21	0,25	0,27	0,2	0,34	0,52
14	Активация — состав 2	100	122	130	0,12	0,15	0,17	0,22	0,4	0,58
15	Нанесение металлического покрытия (в цинкатных электролитах)	1115	1232	1350	480	670	800	0,8	1	1,2
16	Нанесение металлического покрытия (в цианистых электролитах)	1220	1478	1580	560	670	820	0,6	0,8	1
17	Нанесение металлического покрытия (в кислых электролитах)	1550	1642	1720	800	1300	1800	0,8	1,1	1,3
18	Нанесение металлического покрытия (в аммикатных электролитах)	1550	1686	1750	900	1800	2400	0,9	1	1,1
19	Фосфатирование погружением	440	546	570	90	120	140	0,3	0,48	0,52
20	Фосфатирование расщеплением	482	624	678	100	200	300	0,5	0,55	0,6
21	Фосфатирование нанесением фосфатирующей грунтовки	485	535	596	90	120	140	0,8	1	1,1
22	Наполнение в хроматном растворе — состав 1	312	325	335	740	830	920	0,2	0,3	0,4
23	Наполнение в хроматном растворе — состав 2	310	338	358	900	1200	1400	0,22	0,28	32
24	Наполнение в хроматном растворе — состав 3	356	378	400	360	450	520	0,25	0,27	0,3
25	Наполнение в хроматном растворе — состав 4	385	412	438	170	230	280	0,18	0,22	0,24
26	Термообработка	255	285	300	0	0	0	0	0	0
27	Пропитка маслами, лаками	200	250	300	0	0	0	0	0	0
28	Гидрофобизирование	115	185	215	0	0	0	0	0	0
29	Сушка	85	112	130	0	0	0	0	0	0



**Рис. 4.** Характеристики базового варианта (сплошная линия) и варианта, обеспечивающего минимум эксплуатационных затрат (пунктирная линия)

В результате решения определен технологический процесс, обеспечивающий минимум эксплуатационных затрат и включающий операции:

$$5 \rightarrow 1 \rightarrow 8 \rightarrow 1 \rightarrow 9 \rightarrow 1 \rightarrow 12 \rightarrow 1 \rightarrow 13 \rightarrow 1 \rightarrow 15 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 19 \rightarrow 1 \rightarrow 22 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 26 \rightarrow 28 \rightarrow 29.$$

Он показан на рис. 3(Б) (операции выделены серым), а его сравнение с базовым процессом по суммарным эксплуатационным затратам и суммарным значениям эмиссий, которые представлены нечеткими числами, приведено на рис. 4. При годовой программе 30 000 м<sup>2</sup> экономия затрат по сравнению с базовым вариантом в рублях определяется нечетким числом (4 957 000, 5 250 000, 5 380 000) и может трактоваться как «примерно 5 250 000 руб.».

Итак, мы построили оригинальную модель, позволяющую предприятиям выбрать НДТ, минимизирующую эксплуатационные затраты и обеспечивающую разрешенные уровни эмиссий. Уровни эмиссий и эксплуатационные затраты операций адекватно представляются нечеткими числами. Новым элементом является определение комбинирования операций различных технологий, а не выбор одного варианта из набора заданных альтернативных технологий.

Направлением дальнейших исследований может быть расширение модели за счет учета дополнительных ограничений. Для выбора НДТ, помимо экологических и экономических, целесообразно учитывать технические, политические и социальные критерии. Включение таких технических ограничений, как требования к площадям, производительности, сроку службы и дополнительных экономических ограничений, например инвестиционной стоимости, не вызывают принципиальных затруднений. В то же время учет ограничений, связанных с политическими и социальными критериями, которые скорее всего релевантно задавать лингвистическими переменными, является серьезной проблемой. Кроме того, интересен вопрос об учете факторов технологического риска, в том числе рисков, связанных с отказами производственного оборудования. В этом случае для оценки рисков также может быть использован лингвистический подход.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Виноградов С.С.** (2002). Экологически безопасное гальваническое производство. М.: Глобус. [Vinogradov S.S. (2002). *Environmentally safe electroplating production*. Moscow: Globus (in Russian).]
- Гусев А.А.** (2015). Эволюция политики эколого-экономического развития // *Экономика и математические методы*. Т. 51. № 2. С. 113–120. [Gusev A.A. (2015). The evolution of policy of ecological and economic development. *Economics and Mathematical Methods*, 51, 2, 113–120 (in Russian).]
- Клейнер Г.Б.** (2001). Экономико-математическое моделирование и экономическая теория // *Экономика и математические методы*. Т. 37. № 3. С. 111–126. [Kleiner G.B. (2001). Economic and mathematical methods and economic theory. *Economics and Mathematical Methods*, 37, 3, 111–126 (in Russian).]
- Левнер Е.В., Птускин А.С., Фридман А.А.** (1998). Размытые множества и их применение. М.: ЦЭМИ РАН. [Levner E.V., Ptuskin A.S., Fridman A.A. (1998). *Fuzzy sets and their applications*. Moscow: CEMI Russian Academy of Science (in Russian).]

- Птускин А.С.** (2018). Энтропийный метод анализа данных для процедуры определения НДТ // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. Т. 11. № 3. С. 203–212. [Ptuskin A.S. (2018). The entropy method of data analysis for the procedure of determining the best available technologies. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 11, 3, 203–212 (in Russian).]
- Птускин А.С., Жукова Ю.М.** (2019). Нечеткая модель выбора комбинации операций при определении наилучшей доступной технологии // *Актуальные проблемы экономики и права*. Т. 13. № 2. С. 1184–1191. [Ptuskin A.S., Zhukova Yu.M. (2019). Fuzzy model of choosing an operation combination when identifying the best available technology. *Actual Problems of Economics and Law*, 13, 2, 1184–1191 (in Russian).]
- Птускин А.С., Левнер Е.В., Жукова Ю.М.** (2016). Многокритериальная модель определения наилучшей доступной технологии при нечетких исходных данных // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. № 6 (111). С. 105–127. [Ptuskin A.S., Levner E., Zhukova Yu.M. (2016). 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, 105–127 (in Russian).]
- Bonano E.J., Apostolakis G.E., Salter P.F., Ghassemi A., Jennings S.** (2000). Application of risk assessment and decision analysis to the evaluation, ranking and selection of environmental remediation alternatives. *Journal of Hazardous Materials*, 1, 71 (1–3), 35–57.
- Bortolini M., Gamberi V., Graziani A., Regattieri A., Mora C.** (2013). Multi-parameter analysis for the technical and economic assessment of photovoltaic systems in the main European Union countries. *Energy Conversion and Management*, 74, 117–128.
- Bréchet T., Tulkens H.** (2009). Beyond BAT: Selecting optimal combinations of available techniques, with an example from the limestone industry. *Journal of Environmental Management*, 90, 1790–1801.
- BREF economics and cross-media effects* (2006). Available at: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/ecm.html>
- Cikankowitz A., Laforest V.** (2013). Using BAT performance as an evaluation method of techniques. *Journal of Cleaner Production*, 42, 141–158.
- Dubois D., Prade H.** (1980). Systems of linear fuzzy constraints. *Fuzzy Sets and Systems*, 3, 37–48.
- Evrard D., Laforest V., Villot J., Gaucher R.** (2016). Best Available Technique assessment methods: A literature review from sector to installation level. *Journal of Cleaner Production*, 121, 72–83.
- Evrard D., Villot J., Armiaou C., Gaucher R., Bouhrizi S., Laforest V.** (2018). Best available techniques: An integrated method for multicriteria assessment of reference installations. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1034–1044.
- García N., Caballero J.A.** (2011). Economic and environmental assessment of alternatives to the extraction of acetic acid from water. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 18, 10717–10729.
- Geldermann J., Rentz O.** (2001). Integrated technique assessment with imprecise information as a support for the determination of best available techniques (BAT). *Spektrum*, 23, 137–157.
- Giner-Santonja G., Aragonés-Beltrán P., Niclós-Ferragut J.** (2012). The application of the analytic network process to the assessment of best available techniques. *Journal of Cleaner Production*, 25, 86–95.
- Herva M., Roca E.** (2013). Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 39, 355–371.
- Ibáñez-Forés V., Bovea M.D., Pérez-Belis V.** (2014). A holistic review of applied methodologies for assessing and selecting the optimal technological alternative from a sustainability perspective. *Journal of Cleaner Production*, 70, 259–28.
- Inuiguchi M., Ramk J.** (2000). Possibilistic linear programming: a brief review of fuzzy mathematical programming and a comparison with stochastic programming in portfolio selection problem — an Approach to Computerized Processing of Uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 111 (1), 3–28.
- Laforest V.** (2014). Assessment of emerging and innovative techniques considering best available technique performances. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 11–24.
- Levner E., Meyzin L., Ptuskin A.** (1998). Periodic scheduling of a transporting robot under incomplete input data: A fuzzy approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 98 (3), 255–266.
- Levner E., Ptuskin A.** (2018). Entropy-based model for the ripple effect: Managing environmental risks in supply chains. *International Journal of Production Research*, 56, 7, 2539–2551.
- Lin F.-T., Yao J.-S.** (2001). Using fuzzy numbers in knapsack problems. *European Journal of Operation Research*, 135, 158–176.
- Lin G.T.R., Shen Y.C.** (2010). A collaborative model for technology evaluation and decision-making. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 69, 94–100.

- Mavrotas G., Georgopoulou E., Mirasgedis S., Sarafidis Y., Lalas D., Hontou V., Gakis N. (2007). 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), 953–973.
- Nguyen H.-T., Dawal S.Z.M., Nukman Y., Aoyama H. (2014). A hybrid approach for fuzzy multi-attribute decision making in machine tool selection with consideration of the interactions of attributes. *Expert Systems with Applications*, 41 (6), 3078–3090.
- Orlovsky S.A. (1984). Multiobjective programming problems with fuzzy parameters. *Control Cybernet*, 13, 175–183.
- Polders C., Van den Abeele L., Derden A., Huybrechts D. (2012). Methodology for determining emission levels associated with the best available techniques for industrial waste water. *Journal of Cleaner Production*, 29–30, 113–121.
- Ramik J., Rimanek J. (1985). Inequality relation between fuzzy numbers and its use in fuzzy optimization. *Fuzzy Sets and Systems*, 16, 123–138.
- Rodríguez M.T., Andrade L.C., Bugallo P.B., Long J.C. (2011). Combining LCT tools for the optimization of an industrial process: material and energy flow analysis and best available techniques. *Journal of Hazardous Materials* 192 (3), 1705–1719.
- Samarakoon S.M.S.M.K., Gudmestad O.T. (2011). The IPPC Directive and technique qualification at offshore oil and gas installations. *Journal of Cleaner Production*, 19, 13–20.
- Sbardella A., Perruchas F., Napolitano L., Barbieri N., Consoli D. (2018). Green Technology Fitness. *Entropy*, 20, 776.
- Tanaka H., Asai K. (1984). Fuzzy linear programming problems with fuzzy numbers. *Fuzzy Sets and Systems*, 13, 1–10.
- Wang J.J., Jing Y.Y., Zhang C.F., Zhao J.H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2263–2278.

## A fuzzy model of the selection of alternative operations of the best available techniques at the installation level

© 2020 A.S. Ptuskin, Yu.M. Zhukova

**A.S. Ptuskin,**

*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, Russia; e-mail: aptuskin@mail.ru*

**Yu.M. Zhukova,**

*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, Russia; e-mail: zjuliam@hotmail.com*

Received 05.12.2019

*This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and Kaluga Region Government (project 18-410-400001).*

*The authors are thankful to S. A. Ptuskin for realizing the solution of the tasks in the illustrating example. We are really grateful for the anonymous reviewer for his critical notes and comments.*

**Abstract.** Rational use of natural resources is one of the priority areas of scientific research. Modern principles of ecological regulation of industrial enterprises activity are based on the concept of the best available techniques (the BAT), i.e. the most effective new techniques that provide the highest level of environmental protection and have reached the level that makes their implementation in the relevant sector of the industry possible. Development and improvement of formal models and methods of the BAT identification remain the actual task. The main used approach is to compare the given alternative technologies and to choose a single technology using the methodology of multi-criteria decision making. The BAT concept does not require using the certain technology, but sets the values of permissible emissions. That is why the combination of technologies without a priori limitation of the use of only one of them can be more effective. This paper considers the task of the BAT determining at the level of installation and a new model of fuzzy mathematical programming is proposed, which allows by selecting a combination of operations of various technologies, including a large number of stages, to minimize the operational costs of the enterprise. Emissions levels and costs corresponding to individual operations are appeared by fuzzy numbers. An illustrative example shows that the use of the model leads to the selection of a combination of operations that is efficient from the point of view of economic parameters and providing emission limits.

**Keywords:** ecology, best available techniques, fuzzy mathematical programming.

**JEL Classification:** C6, O14, Q01, Q57.

**DOI:** 10.31857/S042473880012417-7