

## Литература

1. Комисаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Научные основы процессов ректификации: Т.2. Учебное пособие для вузов / Под ред. Серафимова Л.А. М.: Химия, 2004.
2. Островский Г.М., Зиятдинов Н.Н., Лаптева Т.В., Богула Н.Ю. Оптимальное проектирование системы ректификационных колонн // ДАН. 2010. Т. 431. № 6.

*У статті представлений метод використання індексів для оцінки екологічної безпеки техногенних об'єктів на різних етапах життєвого циклу. Представлено результати для техногенних об'єктів*

*Ключові слова: техногенний об'єкт, екологічний ризик, індекс*

*В статье представлен метод использования индексов для оценки экологической безопасности техногенных объектов на разных этапах жизненного цикла. Представлены результаты для техногенных объектов*

*Ключевые слова: техногенный объект, экологический риск, индекс*

*In the article, the methodology of index usage is presented for the estimation of ecological safety of technical objects on the different stages of life cycle. Results are presented for technical objects*

*Keywords: technical object, ecological risk, index*

УДК 502.3+504.064

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Т. В. Бойко

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра кибернетики химико-технологических  
процессов  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056  
Контактный тел.: (044) 454-9-137  
E-mail: tvbojko@gmail.com

## 1. Введение

Развитие общества на современном этапе все более сталкивается с проблемами обеспечения безопасности и защиты человека и окружающей природной среды. Следствием все больше возрастающего антропогенного влияния на окружающую природную среду и интенсификации использования природных ресурсов, но не всегда рационального и без соблюдения надлежащих мероприятий техногенной безопасности, во многих странах мира проявляется стойкая тенденция к росту количества промышленных аварий и разрушительных стихийных явлений.

Стратегия устойчивого развития общества предполагает оценку безопасности промышленных предприятий с целью предотвращения возможных аварий

и минимизации вреда для окружающей природной среды и человека в случае их возникновения.

Подготовка комплексных решений для согласования противоречивых условий экономического развития и безопасного функционирования промышленных объектов представляет собой необходимую предпосылку национальной безопасности каждой страны. А это, безусловно, обеспечит реализацию концепции устойчивого развития общества.

Значительное место в проблеме обеспечения промышленной и экологической безопасности занимает оценка безопасности. Для этого используются количественные показатели, которые предоставляют возможность проводить обоснованный анализ и принимать решение относительно техногенной безопасности промышленного объекта. В данное время существует

множество разных подходов к проблеме оценки техногенного риска в контексте устойчивого развития общества. Но в то же время нет единой меры устойчивого развития общества. Очевидным есть необходимость разработки некоторого обобщенного показателя устойчивого развития. При формировании метода для комплексной оценки устойчивого развития возможно использование разных методик, но должна быть уверенность в однозначности полученных результатов.

## 2. Особенности экологического риска техногенных объектов

Концепция риска исходит из того, что постоянное наличие в окружающей среде потенциально опасных для здоровья человека веществ всегда создает ту или иную степень реального риска, который отличен от нуля. Риски, которые возникают вследствие функционирования промышленных предприятий, для здоровья человека, окружающей природной среды должны быть идентифицированы, проанализированы, а также ними необходимо руководить с целью предотвращения отрицательных последствий.

Риск, в общем случае, определяется как многомерный вектор, или, многокомпонентный фактор, включающий в себя несколько показателей, которые оценивают категории и вероятности последствий.

Экологический риск, в свою очередь, является оценкой нарушения динамического равновесия в экологических системах, которое приводит к изменению параметров характеристик их абиотических и биотических составляющих в результате природных процессов или техногенной деятельности. Определение экологического риска включает функционально связанные части такие, как информационный ресурс и возможность сопоставления с оценками, полученными другими способами. Поскольку экологический риск своим происхождением обязан хозяйственной деятельности человека, то он напрямую связан с условиями функционирования и состоянием техногенных объектов. Учитывая особенности жизненного цикла техногенных объектов, принципиальное значение имеет этап, на котором он находится: проектирование; регламентная эксплуатация; аварийная ситуация; утилизация. При этом необходимо выделять следующие этапы формирования количественных оценок экологических рисков:

- 1) Определение структуры экологического риска;
- 2) Формирование эталонов состояния природной среды;
- 3) Составление системы количественных показателей;
- 4) Разработка формы агрегированной информации для принятия управленческих решений;
- 5) Формирование алгоритмов трансформации полученной количественной оценки в другие системы показателей.

Непосредственно количественный показатель определяется методом, который выбирается для применения. Для решения этих проблем используют методы математической статистики, теории вероятности, экспертные системы, индексные показатели, методы и модели искусственного интеллекта и тому подобное.

Нужно заметить, что решающим является состав исходной информации (количественная или качественная) и какая неопределенность ей присуща.

## 3. Общая характеристика методов количественной оценки экологической безопасности

Непосредственно количественный показатель определяется методом, который выбирается для применения. Для решения этих проблем используют методы математической статистики, теории вероятности, экспертные системы, индексные показатели, методы и модели искусственного интеллекта и т.д.

Так, статистические методы в своей основе нуждаются в построении интегральной функции распределения потерь и позволяют получать довольно точную оценку риска, а также имеют свойство снижать уровень неопределенности относительно показателя риска по мере накопления экспериментальных данных. Но на этапе проектирования отсутствует исходная информация для построения функции распределения потерь, а также с помощью этих методов довольно тяжело получить объективную оценку возможных последствий сравнительно редких аварий, риск от которых для населения характеризуется математическим ожиданием последствий. Сложность использования статистических методов также связана с необходимостью объединения разнородных показателей безопасности жизнедеятельности для сравнительной оценки опасности регионов, которые, в свою очередь, отличаются географическим положением, площадью, плотностью населения, естественными условиями, уровнем экономического развития, состоянием промышленных объектов и их инфраструктурой [1].

Недостатками вероятностного метода есть его громоздкость и трудоемкость, он нуждается в большом количестве исходных данных, которые в конечном счете приводят к низкой точности получаемых результатов. При отсутствии апробированных математических моделей и достаточно достоверных исходных данных, а также при влиянии на возможность реализации аварии большого количества исходных данных, которые тяжело формализуются, делают применение вероятностных методов почти невозможное.

Использование математического аппарата теории вероятности и математической статистики усложняется низкой точностью и нечеткостью исходных данных по факторам, которые влияют на безопасное функционирование объекта. При этом оценивается риск, как правило, аварии за соответствующим сценарием, в то время когда в нормальных условиях эксплуатации значения риска, особенно, по отношению к окружающей природной среде не определяется [1].

Экспертный метод оценки техногенного риска вместе с определенными преимуществами по сравнению со статистическим и вероятностным методами имеет несколько существенных недостатков. К ним относятся необходимость наличия достаточного количества экспертов для репрезентативности оценки; точность результатов полученных экспертным методом полностью зависит от компетентности экспертов, которые были привлечены к оцениванию; мысли экспертов не всегда совпадают, что усложняет обработку результа-

тов; почти невозможно оценить возможные следствия от возникновения аварии и т.п.

Кроме методов оценки техногенного риска - статистического, вероятностного и экспертного нужно обратить внимание на индексный метод, который имеет ряд преимуществ по сравнению с перечисленными методами.

Преимуществами индексных методов являются использование безразмерных индексных оценок, которые значительно упрощает использование таких методов и уменьшает сложность вычислений. С помощью индексных методов довольно легко сравнивать безопасность разных объектов благодаря тому, что все индексные методы базируются на шкале безопасности, за которой происходит отнесение объекту к определенному уровню безопасности соответственно с полученными значениями индексных показателей. Использование индексного подхода позволяет оценивать вклад того или другого аспекта деятельности предприятия в опасное влияние на окружающую среду в целом или по отдельным компонентам естественной окружающей среды.

**4. Применение индексного метода для оценки экологического риска**

Основой системы количественных оценок были приняты индексы. Если рассматривать индекс не как цель расчета показателей, а меру отклонения от уровня, принятого за эталон (или базовый), то можно получить довольно стройную систему количественных оценок. Такой подход был реализован для техногенных объектов на этапах проектирования и эксплуатации. Так на этапе проектирования основной концепцией, реализуемой на практике, является ОВОС (оценка воздействий на окружающую среду). Как показано в [2] структура экологического риска при проектировании объектов хозяйственной деятельности включает:

- оценку риска планируемой деятельности относительно природной среды;
- оценку риска относительно здоровья человека;
- оценку социального риска.

При оценке риска планируемой деятельности относительно природной среды использовался принцип формирования эталонов состояния в соответствии с действующими нормативами. Следует отметить, что по уровню опасности различают: неприемлемый – уровень риска > 10<sup>-6</sup>; приемлемый – 10<sup>-6</sup> ≥ уровень риска ≥ 10<sup>-8</sup>; безусловно приемлемый – уровень риска < 10<sup>-8</sup> [1].

В расчетах функции желательности использовалась следующая зависимость:

$$d_j = e^{-(e^{-y_j})}, \tag{1}$$

где d<sub>j</sub> – функция желательности для j-го индекса загрязнения окружающей природной среды; y<sub>j</sub> – некоторая безразмерная величина, которая связана с особенностями техногенного объекта и определяется по формуле (2):

$$y_j = \frac{2 \cdot I_j - \left[ \max\left(\frac{P_{fi}}{P_{ni}}\right) + \min\left(\frac{P_{fi}}{P_{ni}}\right) \right]}{\left[ \max\left(\frac{P_{fi}}{P_{ni}}\right) - \min\left(\frac{P_{fi}}{P_{ni}}\right) \right]}, \tag{2}$$

где I<sub>j</sub> = F<sub>j</sub>(P<sub>fi</sub>/P<sub>ni</sub>) – значение индекса загрязнения j-го компонента окружающей природной среды, который определяется как функция F<sub>j</sub> отношения фактического значения P<sub>fi</sub> показателя i-го загрязняющего вещества (например, фактическое содержание оксида углерода в атмосфере) к нормативному значению P<sub>ni</sub> (предельно допустимой концентрации).

Перспективным является установление связи показателей (индексов) с уровнем экологического риска, который формируется для объекта хозяйственной деятельности. Если провести сопоставление значения функции желательности как количественной оценки качества компонента окружающей среды (согласно объекту, который проектируется) и значение принятого уровня опасности, то можно получить соответствие, которое представлено в [3,4]. Так зависимость, полученная методами регрессионного анализа в работе [3], имеет вид (3):

$$risk_i = a \cdot e^{bd_i}, \tag{3}$$

где определенные a = 4,99 · 10<sup>-6</sup>, b = -7,557.

Применение такого подхода возможно как для предприятий, в целом, (например, оценка результатов введения в действие нового агрегата теплоэлектростанции), так и для отдельных аппаратов (например, для осуществления процесса конверсии оксида углерода в производстве аммиака), что представлено в табл. 1. Так для тепловых электростанций специфическими загрязнителями по атмосфере являются оксид азота, серный ангидрид и зола. Контролируемые показатели по гидросфере: водородный показатель; биологическая потребность кислорода; концентрация растворенного кислорода, нитрат- и нитрит-ионов; СПАВ; нефтепродукты. Для почвы расчеты проводились по 20 химическим элементам, среди которых барий, фосфор, хром, медь, ванадий и прочие [5-7]. Представленные в табл. 1. данные выборочные для наихудших показателей (для атмосферы – по золе, для гидросферы – по нитрат-иону, для почвы – по меди).

Так, как показано в работе [8], для оценки экологической безопасности процесса конверсии оксида углерода в агрегате с каталитической конверсией природного газа под давлением 2,0 МПа применение различных методик дает различный результат, применение единой шкалы на основе функции желательности позволяет исключить противоречие, что подтверждает и применение выше представленного алгоритма. Основные результаты представлены в табл. 1.

**Таблица 1**

**Оценка экологического риска на этапе проектирования**

Объект	Компонент окружающей природной среды	Результаты оценки по действующим методикам		Значение функции желательности	Оценка экологического риска
		Обобщенный показатель:	Вывод:		
Тепловая электростанция	Атмосфера	кратность превышения равна 3,3	уровень загрязнения недопустимый	0,355	3,412·10 <sup>-7</sup>

Продолжение таблицы 1

	Гидро-сфера	индекс загрязнения вод 4,3	уровень загрязнения допустимый	0,626	$4,406 \cdot 10^{-8}$
	Почва	коэффициент концентрации 1,323	уровень загрязнения допустимый	0,51	$1,058 \cdot 10^{-7}$
Агрегат с катализаторной конверсией природного газа	Атмосфера	кратность превышения равна 3,26	уровень загрязнения недопустимый	0,34	$3,821 \cdot 10^{-7}$

Представленные процессы по степени опасности и уровню риска относятся к таким, что должны быть применены мероприятия, направленные на снижение концентраций загрязняющих веществ в атмосфере.

Автор является одним из разработчиков [9,10] методологической основы для осуществления классификации потенциально экологически и техногенных опасных объектов, в обращения которых находятся вредные вещества. Для количественной оценки используется понятие "индекс риска", которое по характеру зависимости от разнообразных факторов и по своему смыслу является аналогом оценки вероятности возникновения аварий на работающем оборудовании.

В основу получения и использования численных значений индексов риска положены допущения о связи возможности возникновения аварии с интенсивностью влияния на источники опасности техногенных и местных природных факторов независимо от конструктивных особенностей оснащения, то есть самое наличие факторов риска определяет возможность аварии. Значения индекса потенциальной опасности определяется количеством и степенью опасности (для человека и окружающего природной и техногенной сред) веществ, которые содержатся в источнике опасности, независимо от конструктивного выполнения оборудования, которое отвечает критериям опасности, принятым в мировой практике. Опасность объекта для окружающей природной и техногенной сред и человека считается прямо пропорциональной величина индекса риска и потенциальной опасности.

Оценка относительной опасности промышленных предприятий осуществляется для каждого отдельного источника опасности с учетом их возможного взаимовлияния. При наличии на предприятии разных видов опасных веществ, которые способны вступать во взаимодействие с образованием новых опасных веществ, ведется оценка потенциальной опасности, как отдельных веществ, так и их соединений. В случае невозможности получения количественных оценок образования опасных соединений (смесей) за основу их количества принимается сумма начальных опасных веществ. Оценка относительной опасности промышленных предприятий осуществляется с учетом как внутренних, так и внешних факторов.

Определенный лимитированный типовой набор внутренних и внешних факторов, который может изменяться (дополняться) с учетом специфики производственной деятельности промышленных предприятий и мест их расположения. Оценка опасности промышленного предприятия определяется индексом относительной опасности отдельного предприятия. По величине индекса относительной опасности осуществляется ранжирование предприятий, которое может отображать характер относительной опасности предприятия.

Основным показателем является индекс относительной опасности, как комплексная характеристика, которая позволяет определять категорию опасности в соответствии с разработанной пятиуровневой шкалой. На основе рассчитанных индексов относительной опасности проводится отнесения промышленных предприятий к категории опасности.

Индекс относительной опасности промышленного предприятия определяется как максимальное значение из совокупности унитарных индексов относительной опасности для каждого отдельного источника, который предоставляет возможность сформировать представление про возможные отрицательные следствия при возникновении аварии на предприятии с учетом наиболее плохого сценария развития событий.

Индекс относительной опасности компактно расположенного промышленного предприятия определяется по формуле (4):

$$D_{RL} = \max_{i=1,n}(D_{RL_i}), \quad (4)$$

где  $D_{RL_i}$  - унитарный индекс относительной опасности отдельного источника;  $n$  - количество источников опасности промышленного предприятия.

В свою очередь унитарные индексы относительной опасности учитывают такие факторы как: изношенность промышленного оборудования; технологические параметры организации производственных процессов; человеческий фактор (учет уровня квалификации персонала); географическое расположение, от которого зависит влияние природных явлений на безопасность работы объекта; наличие других источников опасности техногенного происхождения вблизи объекта, опасность которого оценивается. Унитарный индекс потенциальной опасности непосредственно зависит от наличия на объекте опасных веществ и соединений.

Благодаря этому становится возможной провести комплексную оценку объекта опасности в зависимости от комбинации разнообразных факторов, которые повышают вероятность возникновения аварии, и могут привести к увеличению отрицательных последствий от ее возникновения.

Для компактно расположенного предприятия (в границах одной огражденной территории независимо от ее размеров) результирующим индексом опасности является максимальный индекс из ряда унитарных индексов, которые рассчитаны для отдельных видов опасностей. Для территориально распределенных предприятий индексы опасности их отдельных частей рассчитываются как для отдельных предприятий.

Для формирования обобщенного критерия оценки безопасности использовалась функции желательности

сти. Для построения обобщенной функции желательности используются полученные по разным методикам значения индексных показателей, которые преобразуются в безразмерную шкалу желательности. Построение шкалы желательности, которая устанавливает соотношения между значением индекса риска  $D_{RL}^m$  и соответствующим ему значением  $d$  (частной функции желательности), является в своей основе субъективной, что отражает отношение эксперта к отдельным индексным показателям. Так модифицированный индекс относительной опасности рассчитывается по зависимости (5):

$$D_{RL}^m = 1 - \sqrt[4]{d_{PT} \cdot d_{RS} \cdot d_{EX} \cdot d_{TX}}, \quad (5)$$

где  $d_{PT}$  – частная функция желательности для индекса потенциального ущерба, зависящего от максимальной суммарной массы опасного вещества одного типа, которое используется на данном компактно расположенном потенциально опасном объекте, его пороговой массы и количества таких веществ;  $d_{RS}$  – частная функция желательности для индекса риска, который зависит от экзогенных и эндогенных факторов, специфики промышленной площадки, изношенности оборудования;  $d_{EX}$  – частная функция желательности для индекса пожаровзрывобезопасности, который учитывает взрывоопасности веществ, их количества, опасность воспламенения, теплового излучения и технологических параметров процесса;  $d_{TX}$  – частная функция желательности для индекса токсичной опасности, которая учитывает токсичную опасность, размер возможной зоны заражения токсичным веществом, и срок экспозиции его действия.

На основе такого подхода разработана методика, которая представлена в работах [9,10].

Формирования обобщенного критерия оценки техногенной безопасности с целью измерения устойчивого развития является важной и непростой задачей. Невозможно одновременно охватить все аспекты постоянного развития человечества, но нужно стараться создать отдельные критерии для разных направлений постоянного развития промышленных предприятий, которые бы полнее отображали каждое свою специфическую характеристику. Как один из таких критериев в области техногенной безопасности в качестве составной части показателей устойчивого развития общества может быть использованный индекс относительной опасности.

Соответственно предложенному алгоритму в [9] выражение для расчета индекса относительной опасности может дополняться новыми индексами опасности, которые используются в других методиках, что позволит более полно и всесторонне оценить уровень безопасности техногенного объекта по разным критериям.

Применение к действующим объектам идеи связывания индексных оценок с вероятностными дает также непротиворечивые результаты. Так, в табл. 2 представлены результаты оценки опасности на основе системы индексов и вероятностных оценок.

В качестве примера для расчета риска и уровня безопасности промышленного предприятия с использованием разработанной методики был рассмотрен среднетемпературный конвертор, который используется в процессе конверсии оксида углерода при производстве синтеза-газа (азотоводородная смесь) для синтеза аммиака.

Учитывалось месторасположение, близость железной дороги, радиус санитарно-защитной зоны, глубина грунтовых вод, особенности промплощадки, особенности технологического процесса (температура, давление, состав реакционной смеси и т.д.)

Таблица 2

Результаты оценки опасности на основе системы индексов и вероятностных оценок для среднетемпературного конвертора в производстве синтез-газа

Показатели опасности на основе индексных оценок		Показатели опасности на основе вероятностных оценок	
Наименование показателя	Значение	Составляющая величины риска	Значение
Индекс риска возникновения аварии	0,22	Риск возникновения аварии из-за внутренних экзогенных и эндогенных факторов, специфики промышленной площадки, изношенности оборудования и др.	$1,375 \cdot 10^{-8}$
Индекс потенциального ущерба	0,338	Риска возникновения аварии от максимальной суммарной массы опасного вещества одного типа, который используется на данном компактно расположенном потенциально опасном объекте, его пороговой массы и числа таких веществ.	$3,353 \cdot 10^{-8}$
Индекс пожаровзрывобезопасности	0,148	Риск из-за взрывоопасности веществ, их количества, опасности воспламенения, теплового излучения, специфических технологических параметров процесса.	$7,978 \cdot 10^{-9}$
Индекс относительной опасности	0,185	Риск возможных отрицательных последствий при возникновении аварии на предприятии с учетом наиболее плохого сценария развития событий.	$1,055 \cdot 10^{-8}$
Индекс региональной опасности	0,197	Риск возможных чрезвычайных ситуаций из-за особенности расположения объекта (близость нефтепроводов, железных дорог, аэродромов и др.)	$1,155 \cdot 10^{-8}$
Категория опасности - малоопасный объект		Уровень риска – приемлемый	
Масштаб опасности - объектный			

## 5. Выводы

Анализ экологического риска как системы качественных и количественных показателей техногенного объекта, которая характеризует его влияние на компоненты окружающей среды, позволило применить индексные оценки как меру отклонения от эталона или нормы соответствующей характеристики. Преимуществом применения индексов является простота расчетов, возможность использовать уже существующие методики, возможность приведения к единой шкале и агрегирование информации. Разработанный алгоритм трансформации индексных оценок в вероятностные дает непротиворечивые результаты.

### Литература

1. Алымов В.Т. Техногенный риск: Анализ и оценка/ В.Т. Алымов, Н.П. Тарасова. –М.:ИКЦ «Академкнига».– 2006.–118с.
2. Бойко Т.В. К вопросу определения рисков при оценке воздействий техногенных объектов на окружающую среду/ Т.В. Бойко //Восточно-европейский журнал передовых технологий. Технология неорганических и органических веществ и экология.–2008.– №4/6 (34).– С.37-41.
3. Бойко Т.В. Кількісні показники оцінки техногенної безпеки об'єктів /Т.В.Бойко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии.–2009.– №1/2 (37).– С.14-17
4. Бойко Т.В. Особливості використання метода «індекс-ризик» для оцінки техногенної безпеки об'єктів / Т.В. Бойко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. –2009. №6/5 (42). – С.44–47.
5. К вопросу количественной оценки загрязнения атмосферного воздуха в системе ОВОС/ Г.А. Статюха, И.Б. Абрамов, Т.В. Бойко, А.А. Ищишина // Восточно-европейский журнал передовых технологий.– 2008.– №1/3(31): Технология неорганических и органических веществ и экология.– С.36-39.
6. Статюха, Г.А. К вопросу количественной оценки загрязнения водной среды при проектировании предприятий/ Г.А. Статюха, Т.В. Бойко Т.В., А.А. Ищишина // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-21: Сб. трудов XXI международ. науч. конф.: в 10 т. Т. 3. Секция 3,4., Саратов, 2008. – С.227-231.
7. Статюха, Г.А. Алгоритм количественного анализа загрязнения почвы при проведении ОВОС/ Статюха Г.А., Бойко Т.В., Ищишина А.А. //Вісник Черкаського державного технологічного університету.–2009.– №2.– С.107-110
8. Статюха Г.А. К вопросу оценки экологической безопасности объектов химической технологии при проектировании /Г.А.Статюха, Т.В.Бойко, А.А.Ищишина //Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного університету (технічні науки). «Тематичний випуск. Сучасні проблеми технології неорганічних речовин»:Дніпродзержинськ. – 2008. – С.121–124.
9. Статюха Г.О. Розробка методики оцінки небезпечних видів діяльності промислових підприємств (Частина 1)/ Г.О. Статюха, Т.В. Бойко, В.І. Бендюг // Екологія і ресурси. – Київ. – 2003.– Вип.7.– С.46-54.
10. Статюха Г.О. Бендюг Розробка методики оцінки небезпечних видів діяльності промислових підприємств (Частина 2)/ Г.О. Статюха, Т.В. Бойко, В.І. Бендюг // Екологія і ресурси, Київ, 2003,Вип.8,с.22-31.