

**УДК 614.8:502.5+614.7:049.3**

*Г. Д. КОВАЛЕНКО*, докт. физ.- мат. наук, проф., зав.лаб., УкрНИИЭП,  
Харьков,

*А. В. ХАБАРОВА*, мнс, УкрНИИЭП, Харьков

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ  
НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫБРОСОВ  
ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УКРАИНЫ**

Обґрунтовано застосування розробленої методики комплексної оцінки екологічного ризику при впливі хімічних та радіаційних факторів на навколишнє середовище та здоров'я населення, яка дозволить оцінити раніше недостатньо вивчену хімічну та радіаційну складові в реалізації екологічного ризику при нормальній експлуатації паливно-енергетичного комплексу. Наведено порівняльну оцінку екологічного ризику для здоров'я населення при впливі викидів ТЕС і АЕС у приземному шарі атмосферного повітря.

**Ключові слова:** викиди ТЕС і АЕС, хімічна та радіаційна складова, екологічний ризик для здоров'я населення.

Обосновано применение разработанной методики комплексной оценки экологического риска при воздействии химических и радиационных факторов на окружающую среду и здоровье населения, которая позволит оценить ранее недостаточно изученную химическую и радиационную составляющие в реализации экологического риска при нормальной эксплуатации топливно-энергетического комплекса. Приведена сравнительная оценка экологического риска для здоровья населения при влиянии выбросов ТЭС и АЭС в приземном слое атмосферного воздуха.

**Ключевые слова:** выбросы ТЭС и АЭС, химическая и радиационная составляющие, экологический риск для здоровья населения.

Application of developed methodology for the ecological risk complex assessment from the influence to chemical and radiological factors to the environment and human health is theoretically substantiated, which are allowed to evaluated not enough chemical and radiological constituents in the implementation of ecological risk for the normal operation of the fuel and energy complex. The comparative assessment of the ecological risk to human health is carried out at the impact of emissions from the surface layer of air in the normal operation of the TPP and NPP.

**Keywords:** emissions of the TPP and NPP, chemical and radiological constituents, ecological risk for the human health.

**Введение**

Приемлемость деятельности объектов повышенной экологической опасности принято оценивать на основе анализа риска для здоровья человека [1]—[4].

В настоящее время в Украине не существует общепризнанной и утвержденной на законодательном уровне методологии комплексной оценки экологического риска как главного инструментария для определения степени экологической опасности деятельности промышленного объекта.

## **Анализ предыдущих исследований**

Для определения степени экологического риска в литературе встречаются различные методы его оценки: статистический метод, метод экспертных оценок, метод системного анализа риска. Однако имеются недостатки существующих методов:

- трудоемкость в процессе получения необходимой информации при обработке статистических данных об аварийных случаях методами математической статистики, а при ее отсутствии приводит к недостоверным результатам;

- соответствующий профессиональный и квалификационный уровень лиц, принимающих участие в экспертизе, что требует значительных усилий при формировании групп экспертов, организации их работы.

Существуют также подходы к оценке экологического риска, концептуальные сходства и отличия которых, приведены ниже.

Основу системы ПДК составляют следующие положения:

- пороговый принцип распространяется на все эффекты неблагоприятного воздействия;

- превышения норматива ПДК может вызвать неблагоприятные для здоровья эффекты, при этом отсутствует практический механизм определения эффектов и их количественного выражения.

Основными принципами оценки риска по методу US EPA являются:

- для неканцерогенных веществ используется пороговая модель "доза-эффект";

- для канцерогенных используется беспороговая модель "доза-эффект", при этом нормирование осуществляется по уровню приемлемого риска:

- риск индивидуального уменьшения продолжительности жизни равен "тангенсу угла наклона" умноженному на "среднюю дозу в течение жизни";

- популяционный риск равен "индивидуальному риску", умноженному на "размер популяции".

При этом необходимо принять ненулевую, но "достаточно низкую" дозу, которая считается безопасной для пребывания населения в данных условиях в течение "среднестатистической" продолжительности жизни [1, 5].

Выше приведенные методы оценки экологического риска не позволяют сравнивать воздействие факторов различной природы на здоровье человека в единых показателях, что является главным недостатком существующих методик.

## **Цель работы**

Разработка методики комплексной оценки экологического риска для здоровья населения при воздействии выбросов в приземный слой атмосферного воздуха крупных ТЭС Украины (более 300 МВт) и АЭС, работающих в штатном режиме.

## **Материал и результаты исследования**

В данной работе предлагается подход к комплексной оценке экологического риска для здоровья населения, длительно проживающего в районах расположения предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК), при хроническом воздействии малых доз ионизирующего излучения в сочетании с

химическими компонентами пылегазоаэрозольных выбросов ТЭС, работающих на каменном угле.

Под термином «экологический риск» в данной работе понимается вероятность возникновения неблагоприятных эффектов для здоровья человека вследствие загрязнения окружающей природной среды радиоактивными и вредными химическими веществами.

### Концепция экологического риска

Концепция экологического риска включает оценку и управление риском. Различают четыре основных этапа оценки экологического риска [1, 5, 6].

Идентификация опасности – первый этап оценки экологического риска при эксплуатации ТЭК – направлен на выявление опасности, установление источников и факторов экологического риска, в частности химического и радиационного, а также зон распространения риска.

Оценка экспозиции – второй этап оценки экологического риска при эксплуатации ТЭК заключается в оценивании реального влияния факторов экологического риска на здоровье населения.

Оценка зависимости "доза-эффект" – третий этап оценки экологического риска при эксплуатации ТЭК, связанный с анализом химических и радиационных факторов экологического риска на здоровье населения.

Характеристика риска – четвертый, заключительный этап включает полную характеристику экологического риска при эксплуатации ТЭК.

На рис. 1 приведен алгоритм оценки экологического риска, предложенный авторами, в соответствии с которым предполагается оценка канцерогенных и не канцерогенных химических и радиационных веществ [7].

Заключительная стадия модели оценки экологического риска при эксплуатации ТЭК, характеристика экологического риска, одновременно является первым звеном процедуры управления им. Основная цель управления

экологическим риском при эксплуатации ТЭК складывается в выявлении путей снижения риска при заданных ограничениях на ресурсы и время. Согласно беспороговому принципу, воздействие как радиоактивных, так и химических веществ даже в малых дозах считается вредным, т. е. способно вызвать патологические изменения в организме человека [1, 8 – 10, 11].



Рис. 1. Алгоритм оценки экологического риска [7]

Поэтому для оценки риска используют линейные модели интерполяции зависимости «доза—эффект» в области малых доз вредных загрязняющих веществ.

Совокупное воздействие ионизирующего излучения и химических веществ на организм человека вызывает различные неблагоприятные эффекты, которые проявляются в отдаленные периоды. В исследованиях [1, 8 – 10, 11] отмечен идентичный характер их связей: при снижении дозы частота эффекта снижается, а латентный период возникновения случаев соматико-стохастических эффектов увеличивается.

В основе предлагаемой авторами методики комплексной оценки экологического риска используется вероятностный подход для определения ожидаемого числа дополнительных случаев возникновения соматико-стохастических эффектов в популяции при фактических уровнях воздействия исследуемых химических или радиоактивных веществ.

Методика комплексной оценки экологического риска позволяет в комплексе оценить радиационную и химическую составляющую в реализации экологического риска для здоровья населения в единых показателях вероятности соматико-стохастических эффектов на единицу индивидуальной дозы и количество случаев соматико-стохастических эффектов на единицу коллективной дозы с использованием факторов риска для оценки экологического риска для здоровья населения, рассчитанных авторами данной работы для неканцерогенных химических веществ, которые учитывают вероятность возникновения соматико-стохастических эффектов, отнесенные к единице дозы.

Оценка экологического риска основана на установлении причинно-следственных связей между показателями здоровья населения и факторами загрязнения окружающей среды [12].

С целью установления причинно-следственной связи при воздействии вредных токсических (канцерогенных) веществ и возникновения соматико-стохастических эффектов у населения, проживающего в районах эксплуатации ТЭК в течение 70 лет, работающих на каменном угле, применяется зависимость между дозой вредного вещества и вызываемым эффектом для определения величин риска реализации соматико-стохастических эффектов как дополнительных случаев рака. Уровень приемлемого риска для канцерогенных веществ составляет  $10^{-6}$  мг<sup>-1</sup>, а для неканцерогенных –  $10^{-5}$  [5].

#### **Гипотеза о линейном характере связи между дозой и откликом**

Реализация экологического риска  $r$ , обусловленного присутствием в окружающей природной среде вредного токсического (канцерогенного) вещества, зависит от его дозы, поступившей в организм человека.

$$r = f(D). \quad (1)$$

Предполагается, что в области малых доз соотношение между дозой и реакцией на нее является линейным. Кроме того, предполагается, что действие вредного токсического (канцерогенного) химического вещества не имеет порога.

Таким образом, гипотеза о линейном беспороговом характере зависимости «доза – эффект» в области малых значений порога позволяет оценивать дополнительный риск по формуле [13 – 15]

$$[r(D)]_{ij} = (F_D \cdot c \cdot v \cdot t)_{ij}, \quad (2)$$

где  $c$  — концентрация вредного токсического (канцерогенного) вещества, мг/м<sup>3</sup>;

$i$  — доза вредного токсического (канцерогенного) вещества, мг;

$j$  — вредное токсическое (канцерогенное) вещество;

$F_D$  — фактор риска, представляющий собой риск, который показывает дополнительный риск, отнесенный к единице дозы, мг<sup>-1</sup>;

$v$  — интенсивность ежедневного поступления в организм человека вредного токсического (канцерогенного) вещества, м<sup>3</sup>/сут;

$t$  — время воздействия вредного токсического (канцерогенного) вещества за 70 лет, сут.

Принятое в Украине стандартное значение объема воздуха, поступающего в легкие населения, составляет  $8,11 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/год [16]. Считается, что каждый житель подвергается риску в течение всей жизни, то соотношение между значениями фактора риска, выраженными в [(мг/кг·сут)]<sup>-1</sup> и в (мкг/м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> принимает вид

$$F_C = F_D \cdot 10^{-3} \cdot 8,11 \cdot 10^3 \cdot 70 = 567,7 \cdot F_D, \quad (3)$$

Значение фактора риска обусловлено возможностью связи риска  $R$  с мощностью дозы токсического (канцерогенного) химического вещества  $H_D$

$$R = F_{HD} \cdot H_D, \quad (4)$$

где  $R$  — количество дополнительных случаев тяжелых последствий при воздействии токсического вещества на население, отнесенное к одному году;

$H_D$  — мощность дозы токсического (канцерогенного) химического вещества, т.е. количество токсического (канцерогенного) химического вещества в 1 мг, отнесенное к 1 кг массы тела человека и к одному дню экспозиции, мг/(кг·сут);

$F_{HD}$  — фактор риска, представляющий собой риск, который показывает дополнительный риск, отнесенный к единице мощности дозы, [мг/(кг·сут)]<sup>-1</sup>.

Связь между факторами риска, выраженными в [мг/(кг·сут)]<sup>-1</sup> и в мг<sup>-1</sup> для населения, в течении всей жизни проживающего в загрязненном выбросами районе эксплуатации ТЭЖ определяется выражением

$$F_{HD} = F_D \cdot m \cdot t = 1,79 \cdot 10^6 \cdot F_D, \quad (5)$$

где  $m$  — массой тела среднестатистического взрослого человека, кг.

Количество дополнительных случаев тяжелых последствий воздействия вредного токсического (канцерогенного) вещества на население, отнесенное к одному году ( $R$ ), записываем в виде формулы

$$R = \left\{ F_{HD} \cdot \sum_{i=1}^n (H_D \cdot N)_i \right\} T, \quad (6)$$

где  $n$  — количество доз каждого вредного токсического (канцерогенного) вещества;

$T$  — время экспозиции, вредного токсического (канцерогенного) вещества, сут;

$N$  — количество населения, подвергающихся воздействию вредных токсических (канцерогенных) веществ;

$n$  — количество доз каждого вредного токсического (канцерогенного) вещества.

Факторы риска, рассчитанные авторами данной работы для неканцерогенных химических веществ, по значениям обусловленных воздействием допустимого риска зависят от того, какая связь между дозой этого токсического (канцерогенного) вещества и вызываемым им эффектом [5, 14]. Предполагается, что соотношение “доза – эффект” не имеет порога, тогда дополнительный риск, устанавливаемый для всей продолжительности жизни индивидуума, или количество дополнительных случаев тяжелых последствий, отнесенное к одному году, может быть рассчитано по величине предельно допустимой концентрации.

Для населения, постоянно проживающего в районе эксплуатации ТЭК, получаем соотношение делением формул (3) на (5)

$$F_C = 3,17 \cdot 10^{-4} \cdot F_{HD}, \quad (7)$$

В результате получаем выражение для расчета фактора неканцерогенного риска по следующей формуле

$$F_{HD} = F_C / 3,17 \cdot 10^{-4}, \quad (8)$$

Полученные значения фактора неканцерогенного риска  $F_{HD}$  приведены в табл. 1.

Таблица 1. Факторы риска возникновения соматико-стохастических эффектов, отнесенные к единице дозы

<b>Неканцерогенные вещества</b>	$F_{Dch}, [\text{мг}/(\text{кг}\cdot\text{сут})]^{-1}$
NO <sub>x</sub>	$1,26 \cdot 10^{-1}$
SO <sub>2</sub>	$2,52 \cdot 10^{-1}$
CO <sub>2</sub>	9,46
V	$2,21 \cdot 10^{-4}$
Co	$1,58 \cdot 10^{-4}$
Cd	$6,31 \cdot 10^{-3}$
Cr	$3,15 \cdot 10^{-4}$
Zn	$2,84 \cdot 10^{-3}$
Pb	$4,73 \cdot 10^{-4}$
Cu	$6,31 \cdot 10^{-5}$
PM 2,5	$4,73 \cdot 10^{-1}$
As	$9,46 \cdot 10^{-3}$
Hg	$9,46 \cdot 10^{-3}$
Cd	$6,31 \cdot 10^{-3}$
<b>Канцерогенные вещества</b>	$F_{Dch}, [\text{мг}/(\text{кг}\cdot\text{сут})]^{-1}$
Ni	0,91*
Pb	$4,20 \cdot 10^{-2}$ *
Cr	42,0*
Cd	6,30*
Benz()	3,10*
<b>Ионизирующее излучение</b>	$F_{Dr}, \text{Зв}^{-1}$
	$6,5 \cdot 10^{-2}$ **

\*Коэффициенты, используемые в подходе Агентства по охране окружающей среде США для оценки канцерогенного риска химических веществ [1].

\*\*Коэффициенты, используемые в подходе МКРЗ 103 для оценки радиационного риска [1].

### **Методика комплексной оценки экологического риска**

Химическая составляющая. Вероятность индуцирования соматико-стохастических эффектов (возникновения фатального рака и серьезных наследственных эффектов при воздействии химических веществ) на единицу дозы химического вещества определяется соотношением

$$r_{ch} = F_{Dch} \cdot D_{ch}, \quad (9)$$

где  $D_{ch}$  — доза химического вещества, мг/кг·сут;

$F_{Dch}$  — коэффициент пропорциональности, определяющий наклон кривой доза — эффект при воздействии химического вещества, отражающий степень нарастания риска с увеличением воздействующей дозы на одну единицу, [мг/(кг·сут)]<sup>-1</sup>.

Ожидаемое количество дополнительных случаев возникновения соматико-стохастических эффектов при воздействии химических веществ

$$R_{ch} = r_{ch} \cdot N, \quad (10)$$

где  $N$  — количество населения, подвергающегося воздействию химических веществ, чел.

Радиационная составляющая. Вероятность индуцирования соматико-стохастических эффектов (возникновения фатального рака и серьезных наследственных эффектов при воздействии ионизирующего излучения) на единицу дозы радионуклида

$$r_r = F_{Dr} \cdot D_r, \quad (11)$$

где  $D_r$  — доза ионизирующего излучения, Зв;

$F_{Dr}$  — коэффициент пропорциональности, определяющий наклон кривой доза — эффект при воздействии ионизирующего излучения, отражающий степень нарастания риска с увеличением воздействующей дозы на одну единицу, Зв<sup>-1</sup>.

Ожидаемое количество случаев соматико-стохастических эффектов при воздействии ионизирующего излучения в группе определяется соотношением [2, 3, 16]

$$R_r = F_{Dr} \cdot S, \quad (12)$$

где  $S$  — коллективная эффективная эквивалентная доза, чел·Зв.

### **Экологический риск при воздействии выбросов ТЭС и АЭС Украины при нормальных условиях эксплуатации**

Радиационная и химическая составляющие экологического риска при хроническом воздействии выбросов в приземный слой атмосферного воздуха всех исследуемых ТЭС за период 2001—2008 гг. и радиоактивных выбросов АЭС за период 2003—2006 гг. рассчитаны с применением методики комплексной оценки экологического риска, предложенной в данной работе.

Оценка радиационной составляющей в реализации экологического риска для здоровья человека обусловлена требованием рекомендаций МКРЗ 103 в

определении уровней риска в единых показателях — вероятности фатального рака [2] и тяжелых наследственных эффектов [3].

В табл. 2 приведены показатели экологического риска для здоровья населения.

Наибольший вклад в реализацию экологического риска в показателях вероятности соматико-стохастических эффектов на 1 ГВт (эл.)·год для здоровья населения обусловлен воздействием ионизирующего излучения при работе всех исследуемых ТЭС —  $9,58 \cdot 10^{-4}$  за 70 лет. Количество дополнительных случаев стохастических эффектов составляет 87,6 за 70 лет из всей популяции.

Значительный вклад в реализацию экологического риска в показателях вероятности соматико-стохастических эффектов на 1 ГВт (эл.)·год для здоровья населения обусловлен воздействием выбросов  $SO_2$  при работе всех исследуемых ТЭС. Количество дополнительных случаев стохастических эффектов составляет 71,6 за 70 лет из всей популяции.

Таблица 2. Показатели экологического риска для здоровья населения [7]

Параметр	Вероятность соматико-стохастических эффектов на 1 ГВт (эл.)		Количество случаев соматико-стохастических эффектов на 1 ГВт (эл.)	
	ТЭС	АЭС	ТЭС	АЭС
$SO_2$	$2,30 \cdot 10^{-4}$	–	71,6	–
$NO_2$	$1,25 \cdot 10^{-5}$	–	3,87	–
$CO_2$	$7,98 \cdot 10^{-5}$	–	24,8	–
Твердые частицы	$1,09 \cdot 10^{-4}$	–	33,8	$1,09 \cdot 10^{-4}$
Ионизирующее излучение	$9,58 \cdot 10^{-4}$	$3,53 \cdot 10^{-6}$	87,6	$6,14 \cdot 10^{-1}$

Вероятность соматико-стохастических эффектов на 1 ГВт (эл.)·год за счет воздействия всех исследуемых АЭС Украины составляет  $3,53 \cdot 10^{-6}$  за 70 лет. Количество дополнительных случаев соматико-стохастических эффектов от воздействия всех исследуемых АЭС Украины —  $6,14 \cdot 10^{-1}$  за 70 лет для всей популяции.

Показатель усредненного комбинированного риска за счет радиационных и химических факторов воздействия на здоровье населения при работе ТЭС и АЭС Украины на 1 ГВт(эл.) произведенной энергии составляет  $1,35 \cdot 10^{-3}$  и  $3,55 \cdot 10^{-6}$  соответственно. Установлено, что значения радиационной составляющей намного больше химической составляющей в реализации экологического риска при производстве электроэнергии, как на ТЭС, так и АЭС.

### Выводы

Разработанная авторами методика комплексной оценки экологического риска позволит в комплексе оценить ранее недостаточно изученную химическую и радиационную составляющие в реализации хронического риска с целью установления соматико-стохастических эффектов у населения, длительно проживающего в районах эксплуатации ТЭС и АЭС, и разработки обосновывающих решений по минимизации экологического риска.

Установлено, что экологический риск для здоровья населения в процессе производства электроэнергии на ТЭС обусловлен в большей степени воздействием радиационной составляющей, чем химической. При производстве электроэнергии на ЮУ АЭС вклад химической составляющей в экологический риск для здоровья населения пренебрежимо мал.

Комбинированный риск за счет радиационных и химических факторов воздействия на здоровье населения при работе ТЭС на 1 ГВт (эл.) почти в 400 раз больше, чем при работе АЭС.

Выявлено, что величина радиационной составляющей существенно больше химической составляющей в реализации экологического риска при производстве электроэнергии, как на ТЭС, так и АЭС Украины [7].

**Список литературы:** 1. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Integrated Risk Information System (IRIS). <http://www.epa.gov/iris>. 2. Radiation Protection. ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). — N.Y.: Pergamon Press, 1991. — 197 p. 3. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection/ Publication 103: Recommendation of the ICRP. Annals of the ICRP Volume 37/2-3. 4. Sources, effects and risks of ionizing radiation // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 Report to the General Assambly with annexes. — New York, 1988. — 123 p. 5. Risk & Decision Making. A Workshop in Risk Assessment, Risk Management & Risk Communication // U.S. Environmental Protection Agency, Aug. 1992. — 186 p. 6. *Панкратова Н. І* *Курилина Б.* Концептуальні основи системного аналізу ризиків у динаміці управління безпекою складних систем // Соціальні ризики та соціальна безпека в умовах надзвичайних катастроф. Під ред. В.В. Дурдинець, Ю.І. Саєнко, Ю.О. Привалов К.: Стилос, 2001. - 497 с. 7. *Г.Д. Коваленко, А.В. Пивень.* Экологический риск для здоровья населения при воздействии выбросов ТЭС Украины. Зб. наук. ст. VI міжнародної науково-практичної конференції “Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення”. – 6-10 вересня 2010 р., м. Алушта, АР Крим. Том 1 – Харків. – 2010. С. 155-161. 8. Сравнительная канцерогенная эффективность ионизирующего излучения и химических соединений. Публикация 96 НКРЗ США. — М., 1992. 9. Демин В. Ф, Голиков В. Я., Иванов Е. В. и др. О нормировании и сравнении риска от разных источников вреда здоровью человека. — М.: Междунар. центр по эколог. безопасности Минатома России, 2001. 10. *В. Ф. Демин.* О линейной зависимости доза—эффект для радиационного и химического риска // Гигиена и санитария. — 2003. — № 6. — С. 37—39. 11. *Г. И. Румянцев, С. М. Новиков.* Проблемы прогнозирования токсичности риска воздействия химических веществ на здоровье населения // Гигиена и санитария. — 1997. — № 6. — С. 13—18. 12. *Коваленко Г. Д., Пивень А. В.* Экологический риск нарушения состояния атмосферного воздуха при воздействии выбросов тепловых электростанций Украины // Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України: Зб. статей п'ятої Всеукр. наук.-практ. конф. 10-11 грудня 2009 р. — Запоріжжя, 2009. — С. 203—205. 13. *Ваганов П.А., Ман-Сунг Им.* Экологические риски. Учеб. пособие. Изд-е 2-е. - СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2001. - 152 с. 14. *Hallenbeck W.H.* Quantitative Risk Assessment for Environmental and Occupational Health. Boca-Raton, 1993. 212 p. 15. *Kunreuther H., Slovic P.* Science, Values, and Risk // Challenges in Risk Assessment and Management. Thousand Oaks; London, 1996. P. 116–125. 16. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97); Государственные гигиенические нормативы. — К.: Отдел полиграфии Укр. центра Госсанэпиднадзора М-ва здравоохранения Украины, 1998. — 134 с.

*Поступила в редколлегию 05.01.2012*