

*В даній статті представлено алгоритм визначення техногенного ризику промислових об'єктів в режимі нормальної експлуатації. Запропонований алгоритм заснований на комплексному використанні методу індексних оцінок та методу Монте-Карло, що дозволяє отримати якісну оцінку ризику та суттєво зменшити негативний вплив проблеми неоднорідності вихідних даних у порівнянні з існуючими методами*

*Ключові слова: техногенний ризик, метод Монте-Карло, імітаційне моделювання, індексний метод, кількісна оцінка, прийнятний ризик*

*В статті представлено алгоритм визначення прогнозного значення техногенного ризику промислових об'єктів в режимі експлуатації. Предложено алгоритм оснований на совместном применении индексных оценок и метода Монте-Карло, что позволяет получить количественную оценку техногенного риска и уменьшить влияние проблемы неопределенности исходных данных по сравнению с используемыми методами*

*Ключевые слова: техногенный риск, метод Монте-Карло, имитационное моделирование, индексный метод, количественная оценка, приемлемый риск*

УДК 519.216+504.064

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27981

# РАСЧЕТ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНОГЕННОГО РИСКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

П. А. Вавулин

Аспирант\*

Email: lestatxa81@mail.ru

Т. В. Бойко

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: tvbojko@gmail.com

\*Кафедра кибернетики

химико-технологических процессов

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

## 1. Введение

Сегодня сложился подход, что та техническая система считается вредной, для которой неблагоприятные воздействия на окружающую среду в процессе эксплуатации полностью определены. При этом по механизму причинения ущерба объекты техносферы могут быть опасными и в процессе нормальной эксплуатации, что проявляется во вредных факторах, сопровождающих эксплуатацию объекта, площади и степень загрязнения прилегающих к объекту территорий в результате выбросов и сбросов. Верхний предел ущерба, который может быть причинен техническим объектом, обозначается как потенциал опасности, различный для случаев нормальной эксплуатации и аварии объекта. Техногенное загрязнение окружающей природной среды, как вид опасности, оценивается при определении прогнозного и аварийного экологического риска. Техногенный риск промышленных объектов чаще связывают с риском аварий. Расчет прогнозного, а не аварийного, техногенного риска промышленных объектов при эксплуатации, как правило, не рассматривается ввиду его изначально малого значения. И все же это актуальная проблема, так как только анализ техногенного риска дает возможность предусмотреть меры по минимизации его или, другими словами, выполнению условий техногенной безопасности. Учитывая, что в соответствии с аксиомами теории техногенного риска любое техническое устройство является источником техногенной опасности, то построение стратегии управления промышленным объектом средствами автома-

тизации будет обоснованным именно при известном прогнозом техногенном риске.

## 2. Анализ исследований и публикаций

В условиях стационарного режима работы промышленных объектов величина риска аварии зачастую оценивается на основании закономерностей общей теории надежности технических систем [1]. Также довольно распространенным подходом к оцениванию рисков сложных технических систем является построение дерева событий и отказов данной системы [2]. Следует отметить, что большое количество исследований связано с определением величины вероятности наступления негативного события при рассмотрении техногенного риска, в традиционной интерпретации этого риска, как произведения вероятности негативного события на величину возможного ущерба от этого события.

При достаточно большом количестве проведенных исследований [3, 4], до сих пор остается чрезвычайно важной задача устранения неопределенности исходных данных для сложных технических систем.

Для устранения этой неопределенности используют различные методы такие как: усреднение значений данных, использование специальных алгоритмов (стохастических, интервальных или нечетких), фильтрация исходных данных и другие. Следует отметить, что все методы дают точечную оценку значения вероятности для технической системы и позволяют оценить в общем случае стационарное состояние системы.

Недостаточное внимание в настоящее время уделяется вопросам оценки техногенного риска промышленных объектов в нормальных условиях работы.

При этом предполагается (чаще изначально), что промышленные объекты в условиях нормальной эксплуатации (или так называемом штатном режиме) не нуждаются в количественной оценке техногенного риска, поскольку вероятность наступления негативного события крайне мала. В таком случае оценивается только вероятность возникновения аварийной ситуации на объекте в целом. Такой подход, как отмечают многие авторы [1, 2, 4], правомерен для несложных технологических объектов (аппарат, установка), а для сложных систем можно ожидать выхода за пределы допустимых значений.

### 3. Формирование целей и задач

Целью данной работы является исследование возможности комплексного применения методов индексного [5] и имитационного моделирования (Монте-Карло), для расчета значения вероятности негативного события для технологической системы в режиме стационарной работы.

Задачей данной работы является расчет техногенного риска сложной системы водонагревателей ТЭЦ, которые работают в режиме нормальной эксплуатации и оценка полученных результатов.

### 4. Расчет техногенного риска системы водонагревателей ТЭЦ

Рассмотрим более детально описанные выше методы с целью их применения на практике. К преимуществам индексных методов относят использование безразмерных индексных оценок, что очень упрощает использование метода и уменьшает количество необходимых расчетов.

Разработанная система индексов устойчивой работы в регламентном режиме [6], или совокупность показателей оценки техногенной безопасности предприятия, представляет следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} D_{RL} &= \max_{i=1,n} (D_{RL_i}), \\ D_{RL_i} &= \exp \left\{ -\frac{1}{4} \left[ \exp(-1,994 + 2,470 \cdot I'_{PTi}) + \exp(-1,720 + 0,0110 \cdot I'_{RSi}) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \exp(-2,159 + 0,0132 \cdot I'_{EXi}) + \exp(-1,994 + 0,01647 \cdot I'_{TXi}) \right] \right\}, \\ I'_{RSi} &= \frac{J_{GR_i} / (1 - J_{SP_i})}{\prod_{k=1}^{m_{EN}} J_{EN_k} \cdot \left[ \sum_{j=1}^{m_{XG}} (1 - J_{XG_j}) \right] / m_{XG}^2}, \\ I'_{PTi} &= \frac{\sum_{j=1}^n Q_{AM_j} / Q_{BN_i}}{n}, \\ I'_{EXi} &= K_{EN} \cdot K_{MT} \cdot K_{FL} \cdot K_{TR} \cdot K_{TC}, \\ I'_{TXi} &= K_{TX} \cdot K_{CA} \cdot K_{DR} \cdot K_{TC}, \end{aligned} \right.$$

где  $D_{RL}$  – индекс относительной опасности компактно размещенного предприятия;  $D_{RL_i}$  – индекс от-

носительной опасности отдельного источника;  $n$  – количество источников опасности промышленного предприятия;  $I'_{RS_i}$  – индекс риска  $i$ -го источника опасности является комбинированным показателем, который учитывает гарантийный период эксплуатации оборудования, работающего в опасных операциях, а так же эндогенные и экзогенные факторы существенно влияющие на его безопасность;  $I'_{PT_i}$  – индекс потенциального ущерба  $i$ -го источника опасности определяет серьезность возможных последствий ЧС. Основой оценки потенциального ущерба являются предельные нормы опасных веществ (соединений) и максимальные количества опасных веществ, которые могут находиться на предприятии фактически. Индексы потенциального ущерба рассчитываются для отдельных источников опасности с учетом их взаимовлияния;  $I'_{EX_i}$  – индекс пожаровзрывоопасности  $i$ -го источника опасности учитывает опасность от наличия на исследуемом объекте пожароопасных и взрывоопасных веществ;  $I'_{TX_i}$  – индекс токсической опасности  $i$ -го источника опасности учитывает токсическую опасность вещества при воздействии технологических параметров процесса, продолжительность ее поражающего действия и размеры возможной зоны.

Выражение для определения индекса относительной опасности отдельного источника полученное по методу построения частных функций желательности преобразованием  $I'_{PT}$ ,  $I'_{RS}$ ,  $I'_{EX}$  и  $I'_{TX}$ , и в безразмерную равномерную шкалу  $y'$  [6]. Ограничения при этом носят характер  $y \leq y_{max}$ . Как доказано в работе [7], частные функции желательности имеют следующий вид:

$$d_{PT} = \exp \left[ -\exp(-1,994 + 2,470 \cdot I'_{PT}) \right], \quad (2)$$

$$d_{RS} = \exp \left[ -\exp(-1,720 + 0,0110 \cdot I'_{RS}) \right], \quad (3)$$

$$d_{EX} = \exp \left[ -\exp(-2,159 + 0,0132 \cdot I'_{EX}) \right], \quad (4)$$

$$d_{TX} = \exp \left[ -\exp(-2,159 + 0,0132 \cdot I'_{TX}) \right]. \quad (5)$$

Индекс относительной опасности, таким образом, будет определяться по формуле, которая входит в систему (1).

Определение величины риска согласно предложенной нами методике [7] с использованием метода индексных оценок производится по формуле:

$$risk = a \cdot e^{bd}, \quad (6)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты,  $d$  – величина индекса относительной опасности отдельного источника промышленного предприятия.

Индекс относительной опасности является комплексным показателем, который учитывает риск выполнения технологических операций

(включая хранение и складирование). Этот индекс учитывает возможный ущерб от возникновения незапланированных инцидентов (аварий), вызванных как внутренними, так и внешними факторами. Также он включает в себя относительную опасность расположения предприятия на определенной промышленной площадке с учетом социальных и географических особенностей места расположения предприятия, которые влияют на возможный ущерб в результате чрезвычайной ситуации.

К недостаткам индексных методов относятся меньшая точность и упрощения при расчетах. Но вместе с тем, их преимуществом является использование безразмерных индексных оценок в качестве индикаторов, что значительно упрощает использование таких методов и уменьшает сложность вычислений. С помощью индексных методов достаточно легко сравнивать риск различных объектов благодаря тому, что все индексные методы базируются на шкале риска, по которой происходит отнесение объекта к определенному уровню риска в соответствии с полученными значениями индексных показателей.

Следует отметить, что система индексов является мерой критичности стационарного режима объекта. Если изменяются показатели штатной работы, то соответственно изменяются и значение индексов, а таким образом и вероятностная оценка риска. Следовательно, при определении индексов для условий постоянной работы получаем величину прогнозного уровня риска, а при критических значениях параметров - значение риска аварии.

Для алгоритмизации оценки техногенных рисков промышленных объектов в процессе нормальной эксплуатации было использовано следующие математические зависимости отказа системы с нескольких элементов:

$$Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^k P_i; Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - Q_i(t)] , \quad (7)$$

где  $Q_i(t)$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента системы, а  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента системы.

Определение вероятности отказа по результатам моделирования осуществлялось по зависимости:

$$P_i = \frac{N}{N_i} , \quad (8)$$

где  $N$  – количество итераций,  $N_i$  – количество отказов  $i$ -го элемента.

Дальнейшие расчеты проводились с использованием методов имитационного моделирования, а именно метода Монте-Карло. Метод Монте-Карло используется для моделирования процессов, на ход которых влияют случайные факторы, а также дает возможность анализировать и оценивать разные «сценарии» реализации решений и учитывать разные факторы рисков в пределах одного подхода. Кроме того, позволяет количественно оценивать неопределенность полученных решений в условиях, когда информация о некоторых данных несет нечеткий, «расплывчатый» характер [8]. Необходимо подчеркнуть, что благодаря методу Монте-Карло и исходя из ожидаемого (полученного с его помощью) спектра решений можно более четко сфор-

мулировать требования к точности, с которой должны представляться исходные данные.

При оценке возможных рисков работы сложного производства используется математический метод, который включает построение графа [9], характеризующего связи между ситуациями и факторами риска. На основании этого метода был определен сценарий развития нежелательных ситуаций в системе, состоящей из семи водонагревателей входящей в технологическую систему ТЭЦ. В частности рассмотрен сценарий, в котором рассматривается возможность отказа одного из семи параллельно соединенных водонагревателей. С точки зрения теории надёжности они рассматриваются как система последовательно соединенных элементов, потому что отказ одного водонагревателя приводит к невозможности подогрева воды в необходимом количестве, следствием чего является отказ системы в целом.

Граф, описывающий систему нагревателей, представленный на рис. 1, имеет данную структуру, поскольку она наиболее точно описывает характер взаимодействия ее элементов. При построении графа в системе OpenFTA было решено разделить элементы системы на две ветви: три функциональных элемента в первой и четыре во второй. Данное разделение предусматривает учёт различий между нагревателями (в системе используются 4 нагревателя низкого давления и 3 – высокого).

При реализации разработанного алгоритма были приняты следующие допущения: номинальные вероятности отказа элементов системы получены исходя из индексных оценок, рассчитанных ранее, граф связей между ситуацией, которая может привести к отказу оборудования и факторами риска, представляется в виде сценария. Методы имитационного моделирования были использованы для уточнения вероятности отказа элементов сложной системы и для расчета техногенного риска системы в целом.

Рассматриваемая система состоит из 4 типов водонагревателей, которые отличаются своими техническими характеристиками: гидравлическим сопротивлением, поверхностью нагревания (от 350 м<sup>2</sup> до 700 м<sup>2</sup>), максимальной температурой пара (от 341 °С до 449 °С), весом (от 10,4 т до 63,5 т). Необходимые для проведения расчетов, исходные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для количественной оценки техногенного риска

Нагреватель	Тип	Номинальная вероятность отказа
Нагреватель низкого давления №1	ПН-350-16-7-IIIнж	1·10 <sup>-5</sup>
Нагреватель низкого давления №2	ПН-350-16-7-III нж	1·10 <sup>-5</sup>
Нагреватель низкого давления №3	ПН-350-16-7-III нж	1·10 <sup>-5</sup>
Нагреватель низкого давления №4	ПН-350-16-7-I нж	1·10 <sup>-5</sup>
Нагреватель высокого давления №1	ПВ-700-265-13	2·10 <sup>-6</sup>
Нагреватель высокого давления № 2	ПВ-700-265-31	2·10 <sup>-6</sup>
Нагреватель высокого давления №3	ПВ-700-265-45	2·10 <sup>-6</sup>

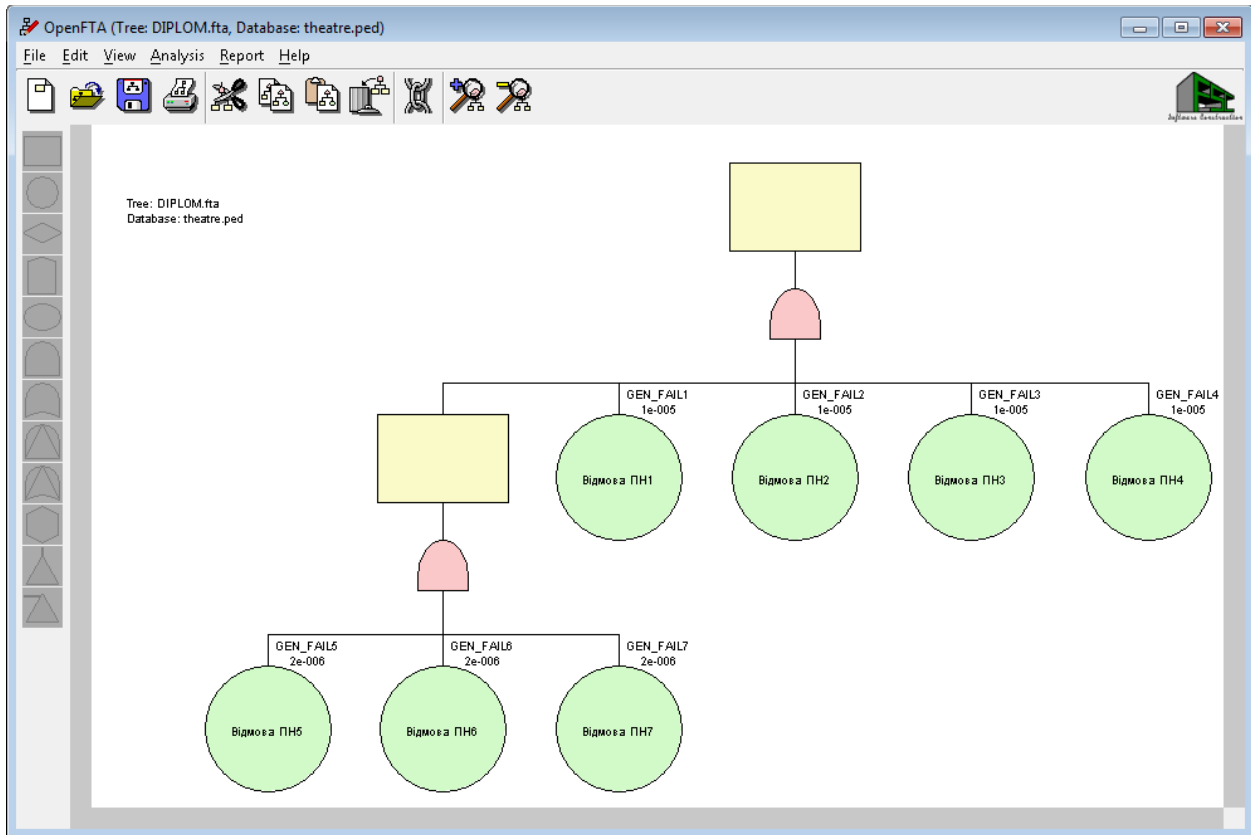


Рис. 1. Дерево отказов для системы из семи водонагревателей ТЭЦ построенное в среде OpenFTA

### 5. Результаты расчета техногенного риска системы водонагревателей ТЭЦ

Сопоставление методов осуществлялось для системы, состоящей из семи эффективных узлов (водонагревателей) в технологической системе ТЭЦ [10]. Первый сценарий использует в качестве исходных данных вероятности отказа оборудования, рассчитанные ранее индексным методом [10].

Второй сценарий использует значения вероятностей, полученные для каждого отдельного нагревателя методом Монте-Карло и составляют, соответственно, для нагревателей  $1 \cdot 10^{-5}$ ,  $1,09 \cdot 10^{-5}$ ,  $0,98 \cdot 10^{-5}$ ,  $1 \cdot 10^{-5}$ ,  $1,5 \cdot 10^{-6}$ ,  $2,1 \cdot 10^{-6}$ ,  $2,7 \cdot 10^{-6}$ .

На первом этапе проводится расчет вероятности отказов одного, двух, трёх и т. д. и всех нагревателей одновременно. Также проводится расчет вероятности отказа всей системы (к нему приводит отказ хотя бы одного из работающих элементов). Вероятность отказа системы в целом включает себя вероятность того что откажет одновременно несколько нагревателей в любой их комбинации (первый и второй, пятый и шестой, или одновременно все).

При использовании метода имитационного моделирования производилась серия испытаний из  $10^8$  итераций для получения вероятности отказа оборудования в режиме нормальной эксплуатации.

Представим полученные результаты расчета различными методами и их сравнение представлены в виде столбчатых диаграмм на рис. 2. Погрешность составляет менее 2 %.

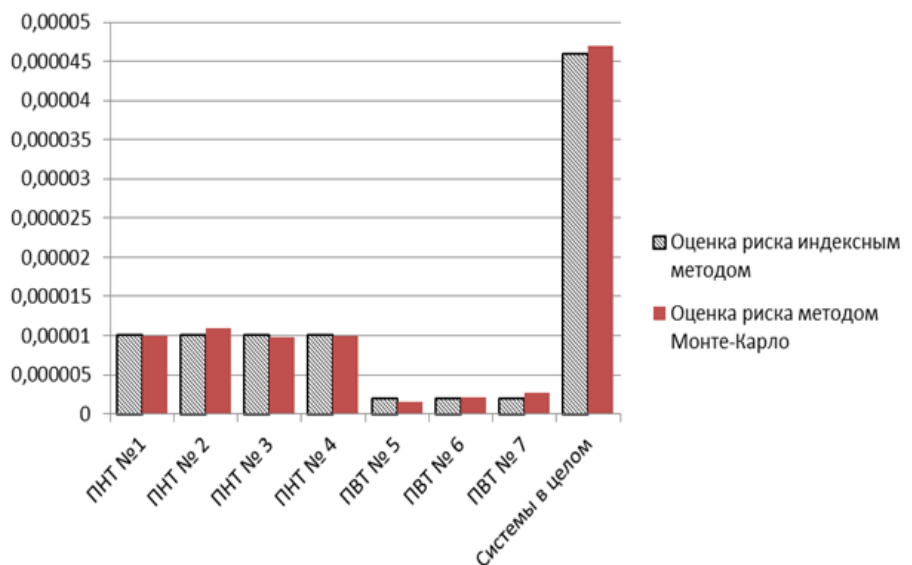


Рис. 2. Результаты реализации алгоритма, основанного на совместном применении индексных оценок и метода Монте-Карло, для системы из семи водонагревателей на ТЭЦ

Система находится на границе неприемлемого и условно-приемлемого уровней опасности, что дает основания для необходимости принятия мер по увеличению надежности системы путем либо увеличения количества резервных элементов системы, либо улучшения их качества (установка более надежных нагревателей).

## 6. Выводы

Описанная методика, позволяет оценивать риск по обобщенной модели техногенного риска. Эта методика включает в себя алгоритм действий при расчете техногенного риска промышленных объектов в стационарном режиме работы. На первом шаге исключается неопределенность исходных данных путем использования индексного метода при получении номинальных вероятностей отказа и строятся сценарий или сценарии отказов системы. На втором этапе проводится оценка вероятностей отказа на основании теории надёжности, после него проводится компьютерное моделирование работы системы методом Монте-Карло. На последнем этапе после сведения результатов принимается решение относительно приемлемости риска при эксплуатации промышленного объекта. То есть предложенная методика, которая включает в себя алгоритм расчета, может использоваться не только для оценки работоспособности системы, но и уточнять номинальные вероят-

ности отказов элементов системы, используя методы имитационного моделирования.

Данная методика позволяет оценить «узкие места» технологического процесса, то есть позволяет оценить действительный вклад каждого элемента системы в общий уровень риска, возникающего в условиях нормальной работы предприятия.

Дальнейшим этапом развития данной методики является получение параметров (коэффициентов) законов распределения вероятности отказа, как элементов, так и всей системы, что позволит получать вероятностные оценки рисков в динамике. Параметры (коэффициенты) законов распределения вероятности планируется находить путем решения задачи аппроксимации коэффициентов. Решать задачу аппроксимации неизвестных коэффициентов закона распределения вероятности отказов системы планируется методами оптимизации, в частности с использованием принципа максимального правдоподобия.

На основе полученных с помощью предложенной методики оценок могут приводиться рекомендации для уменьшения рисков возникновения техногенных чрезвычайных ситуаций, связанных с использованием технического оборудования в режиме нормальной работы. Необходимо сказать, что данная методика имеет возможности масштабирования области применения, то есть может применяться как для небольших систем с малым количеством конечных элементов, так и для больших (с практически неограниченным количеством элементов).

## Литература

1. Острейковский, В. А. Математическое моделирование техногенного риска [Текст] : уч. пос. / В. А. Острейковский, А. О. Генюш, Е. Н. Шевченко. – Сургут: ИЦ СурГУ, 2010. – 83 с.
2. William, R. D. Practical Design of Safety-Critical Computer Systems [Text] / R. D. William. – Reliability Press, 2002. – P 166–176. – Available at: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=863326>
3. Sinnamon, R. M. Quantitative Fault Tree Analysis Using Binary Decision Diagrams [Text] / R. M. Sinnamon, J. D. Andrews. – European Journal of Automation. – 1996. – Vol. 30, Issue 8
4. Boudali, H. A. discrete-time Bayesian network reliability modeling and analysis framework [Text] / H. A. Boudali, J. V. Dugan // Reliability Engineering and System Safety. – 2005. – Vol. 87, Issue 3. – P 337–349. – Available at: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:36074310](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:36074310). doi: 10.1016/j.ress.2004.06.004
5. Бойко, Т. В. Техногенна безпека як невід'ємна частина сталого розвитку регіонів України [Текст] / Т. В. Бойко, В. І. Бендюг, Б. М. Комариста // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – Т. 2, № 10 (44). – С. 52–54. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2781/2587>
6. Бендюг, В. І. Система оцінки техногенної безпеки промислових підприємств: методологія та алгоритм розрахунку [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 21.06.01 «Екологічна безпека» / В. І. Бендюг. – К., 2005. – 193 с.
7. Бойко, Т. В. Особливості використання метода «індекс-ризик» для оцінки техногенної безпеки об'єктів [Текст] / Т. В. Бойко // Восточно-Европейський журнал передових технологій. – 2009. – Т. 6, № 5 (42). – С. 44–47.
8. Смолич, С. В. Решение горно-геологических задач методом «Монте-Карло» [Текст] : уч. пос. / С. В. Смолич, К. С. Смолич. – Чита: ЧитГУ, 2004. – 103 с.
9. Егоров, А. Ф. Управление безопасностью химических производств на основе новых информационных технологий [Текст] / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая. – М.: «ХимияКолосС», 2006. – 416 с.
10. Назаренко, М. В. Особливості визначення техногенного ризику хіміко-технологічних об'єктів на стадії проектування [Текст] / М. В. Назаренко, Т. В. Бойко, В. І. Бендюг // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – Т. 3, № 11 (51). – С. 13–17. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1713/1610>