

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:

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

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 м² до 700 м²), 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 ⁻⁵
Нагреватель низкого давления №2	ПН-350-16-7-III нж	1·10 ⁻⁵
Нагреватель низкого давления №3	ПН-350-16-7-III нж	1·10 ⁻⁵
Нагреватель низкого давления №4	ПН-350-16-7-I нж	1·10 ⁻⁵
Нагреватель высокого давления №1	ПВ-700-265-13	2·10 ⁻⁶
Нагреватель высокого давления № 2	ПВ-700-265-31	2·10 ⁻⁶
Нагреватель высокого давления №3	ПВ-700-265-45	2·10 ⁻⁶

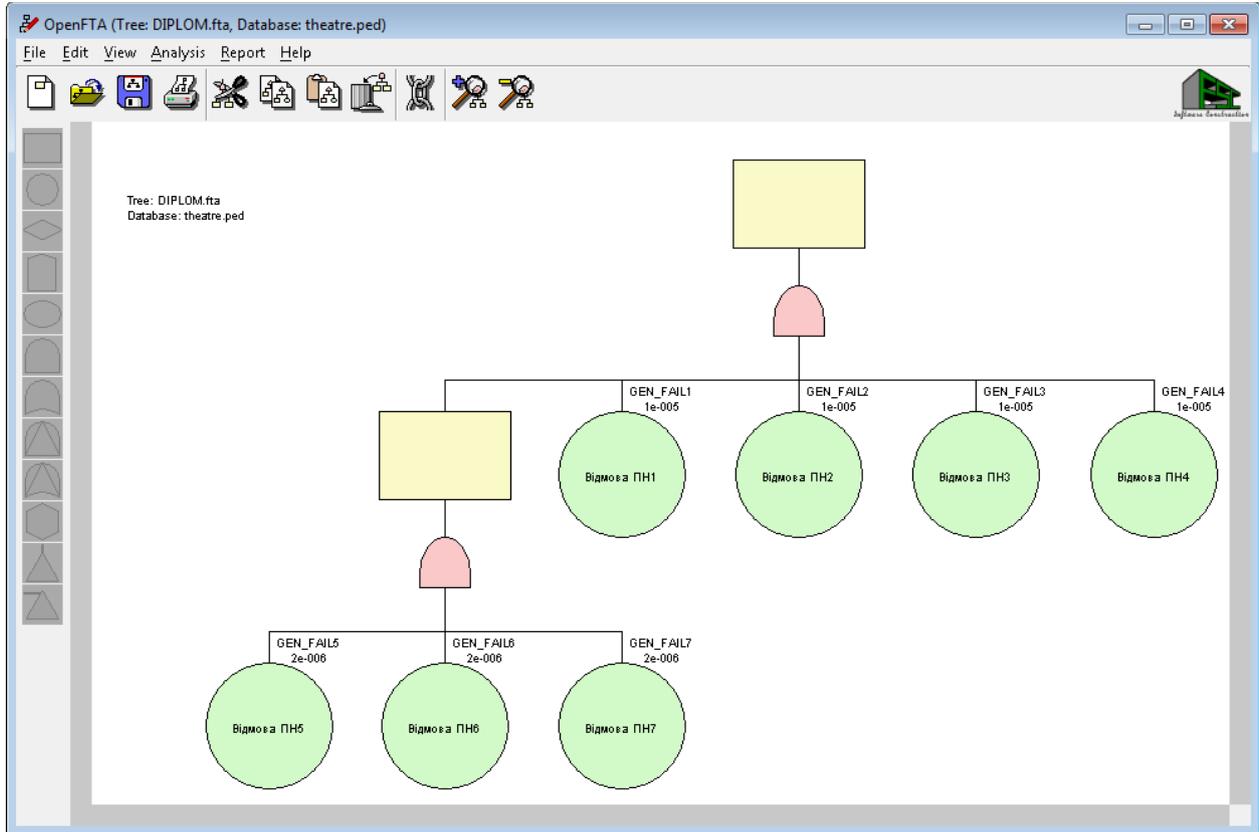


Рис. 1. Дерево отказов для системы из семи водонагревателей ТЭЦ построенное в среде OpenFTA

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 %.

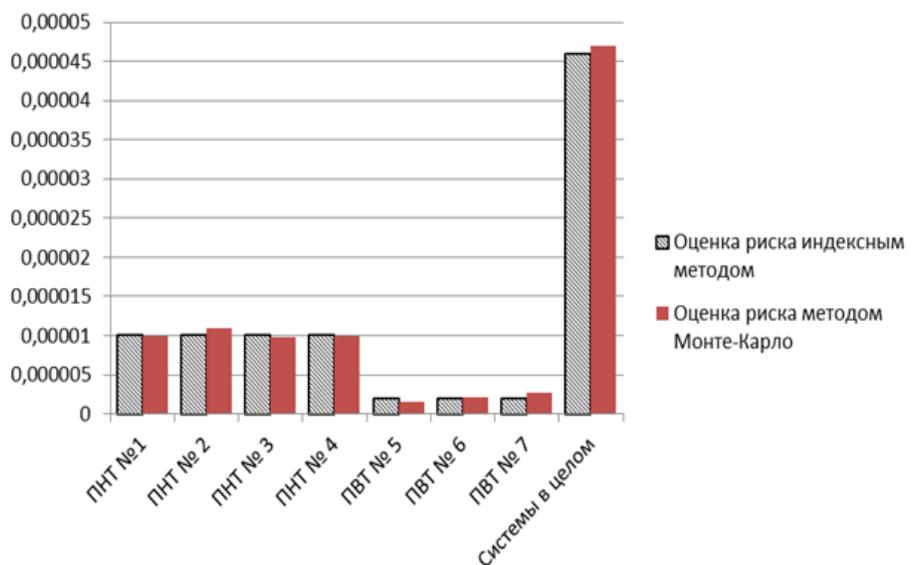


Рис. 2. Результаты реализации алгоритма, основанного на совместном применении индексных оценок и метода Монте-Карло, для системы из семи водонагревателей на ТЭЦ

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. doi: 10.1016/j.res.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>