

УДК 502.3:504.5

АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ОТ ГРУППЫ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ДАННЫМ ПОДФАКЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ПОЛТОРАЦКАЯ В.Н.¹, к.т.н, доц.,
ВЕРГУН О.А.², к.т.н, доц.,
ВАСИЛЬЦОВА О.И.³, ст.гр. ЭКО-12.

¹ кафедра экологии и охраны окружающей среды, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 756-33-71, e-mail: keko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-6244-8439

² кафедра экологии и охраны окружающей среды, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 756-33-71, e-mail: keko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4842-1069

³ кафедра экологии и охраны окружающей среды, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 756-33-71, e-mail: keko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-5212-4510

Аннотация. *Цель.* Построение математической модели, описывающей экологический риск от группы точечных источников выбросов. *Методика.* Методология включает следующие элементы: данные подфакельных измерений, проводимых в соответствии с нормативным документом РД 52.04.186-96; перечень ПДК_к (или ОБУВ_к) для всех выбрасываемых группой источников загрязняющих веществ; проектные параметры группы источников и характеристики внешней среды для наилучших условий; нормативную методику расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86); материалы прогнозной оценки экологического риска от группы точечных источников выбросов. *Результаты.* С использованием полученной математической модели оценки экологического риска разработан алгоритм численного решения задачи. *Научная новизна.* С использованием данных подфакельных измерений определен фактический риск от проявления одновременного воздействия на человека выбросов загрязняющих атмосферу веществ от группы точечных источников промышленных предприятий в зависимости от концентраций загрязнителей. *Практическая значимость.* Разработана модель для группы точечных выбросов оценки фактического (по данным подфакельных измерений) экологического риска одновременного воздействия загрязняющих веществ на человека. Модель оценки риска апробирована на примере действующего предприятия ОАО «Евраз ДМЗ им. Петровского» (ОАО «Днепрококс»), г. Днепропетровск;

Ключевые слова: точечный источник; предельно допустимая концентрация; экологический риск; подфакельные измерения; загрязняющие вещества

АЛГОРИТМ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ВІД ГРУПИ ТОЧКОВИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ДАНИМИ ПІДФАКЕЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ

ПОЛТОРАЦЬКА В.М.¹, к.т.н, доц.,
ВЕРГУН О.О.², к.т.н, доц.,
ВАСИЛЬЦОВА О.І.³, ст.гр. ЕКО-12.

¹ кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 756-33-71, e-mail: keko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-6244-8439

² кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 756-33-71, e-mail: keko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4842-1069

³ кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 756-33-71, e-mail: keko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-5212-4510

Анотація. *Мета.* Побудова математичної моделі, що описує екологічний ризик від групи точкових джерел викидів. *Методика.* Методологія включає наступні елементи: дані підфакельних вимірювань, проведених відповідно до

нормативного документа РД 52.04.186-96; перелік ГДКк (або ОБРВк) для всієї групи джерел забруднюючих речовин, що викидаються; проектні параметри групи джерел і характеристики зовнішнього середовища для найгірших умов; нормативну методику розрахунку концентрацій шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств, в атмосферному повітрі (ОНД-86); матеріали прогнозу оцінки екологічного ризику від групи крапкових джерел викидів. **Результати.** З використанням отриманої математичної моделі оцінки екологічного ризику розроблений алгоритм чисельного рішення задачі. **Наукова новизна.** З використанням даних підфакельних вимірювань визначено фактичний ризик від прояву одночасного впливу на людину викидів забруднюючих атмосферу речовин від групи точкових джерел промислових підприємств в залежності від концентрацій забруднювачів. **Практична значимість.** Розроблено модель для групи точкових викидів оцінки фактичного (за даними підфакельних вимірювань) екологічного ризику від одночасного впливу забруднюючих речовин на людину. Модель оцінки ризику апробована на прикладі діючого підприємства ПАТ «Евраз ДМЗ ім. Петровського» (ОАО «Дніпрококс»), м. Дніпропетровськ.

Ключові слова: точкове джерело; гранично допустима концентрація; екологічний ризик; підфакельні вимірювання; забруднюючі речовини

NUMERICAL SIMULATION ALGORITHM ENVIRONMENTAL RISK GROUPS OF POINT SOURCES ACCORDING UNDERTORCH MEASUREMENTS

POLTORATSKAYA V.N., *Ph. D., Assos.prof.*,
VERGUN O.A., *Ph. D., Assos.prof.*,
VASYLTSOVA O. I., *student of group ECO-12.*

Annotation. Purpose. Construction of mathematical models describing the environmental risk from the group of point sources of emissions. **Methodology.** The methodology includes the following elements: data undertorch measurements carried out in accordance with regulatory document RD 52.04.186-96; PDKk list (or footwear) for all pollutants emitted by a group of sources; design parameters of sources and characteristics of the environment for the worst conditions; regulatory methodology for calculating the concentration in the air of harmful substances contained in industrial emissions (OND-86); Materials predictive environmental risk assessment of the group of point sources of emissions. **Findings.** Using the resultant mathematical ecological risk assessment model developed algorithm for the numerical solution of the problem. **Originality.** Using these measurements undertorch determining the actual risk of a simultaneous manifestation of human exposure to emissions of air pollutants from a group of point sources of industrial enterprises, depending on the concentrations of pollutants. **Practical value.** A model for point emission group to assess the actual (according undertorch measurements) environmental risk at the same time the effects of pollutants on humans. Risk assessment model was tested on the example of existing enterprise JSC «Evraz DMZ them. Petrovsky» (JSC «Dneprokoks»), Dnepropetrovsk;

Keywords: point source; maximum allowable concentration; environmental risks; undertorch measurement; contaminants

Введение

Для обеспечения «устойчивого развития» для человека необходимо с высокой надежностью [1] обеспечить отсутствие нарушений норм, при которых возникает реакция организма на антропогенное воздействие, или, другими словами, обеспечить малый риск нарушений этих норм (экологический риск). Для крупных предприятий возникает задача по оценке рассматриваемой составляющей экологического риска от группы точечных источников [2]. К точечным источникам относятся трубы, через которые удаляются промышленные выбросы, шахты вытяжных систем вентиляции, газоотводные трубы от аппаратов.

Цель

Таким образом, целью данной работы является построение математической модели, которая описывает величину экологического риска от

точечных источников выбросов по данным подфакельных измерений [3].

Методика и результаты

При постановке задачи будем считать, что на территории предприятия задано положение $i = \overline{1, n}$ точечных источников, а также точка А расположенная по направлению ветра за источниками, для которых производятся подфакельные измерения [3]. Источники выбрасывают в атмосферу $k = \overline{1, m}$ ЗВ. В результате g -х измерений получены $n_{изм}$ значений концентраций каждого из k -х ЗВ $C_{kg}^{изм}, g = \overline{1, n_{изм}}; k = \overline{1, m}$, выбрасываемых всеми источниками. Для каждого k -го загрязняющего вещества (ЗВ) задана ПДК_{мрк}. [4]. Если среди ЗВ имеются вещества, обладающие эффектом суммации вредного воздействия и образующие соответствующую группу действия, то в каждом g -м измерении (опыте) приведенные к наихудшим

условиям измеренные концентрации их или прогнозные значения в соответствии с приводятся условно к значениям концентрации $C_g^{изм}$ одного из веществ. Случайная концентрация $C_g^{изм}$ является линейной функцией случайных концентраций $C_{1g}, C_{2g}, \dots, C_{m1g}$ с постоянными коэффициентами $\frac{ПДК_{мр_l}}{ПДК_{мр_k}}$. В этом случае будем считать, что просто произойдет уменьшение числа концентраций $C_{sg}^{изм}, g = \overline{1, n_{изм}}; k = \overline{1, m_1}, m_1 < m$. При этом условно приведенная концентрация будет иметь ПДК_{мр} вещества, к которому производится приведение в группе.

Для каждого источника из группы источника известны прогнозные геометрические и технологические проектные параметры, а также характеристики внешней среды (их математические ожидания и среднеквадратические отклонения).

Модель может быть построена по аналогии с моделью решения задачи для точечного источника [5]. Отличительная особенность здесь будет состоять в том, что расширится объем исходных данных по источникам выбросов ЗВ и изменится приведение

измеренных подфакельных концентраций к наихудшим условиям в течение 20–30 минутного интервала времени, для которых определены ПДК_{мр} ЗВ для населенных мест. При этом наихудшие условия определяются из условия достижения максимального риска.

Статистическая обработка данных по приведенным концентрациям и оценка величины составляющей экологического риска остаются неизменными [6]. Также останется неизменной форма представления результатов. Как и для точечного источника, методология будет включать:

- данные подфакельных измерений, проводимых в соответствии с нормативным документом РД 52.04.186-96 [7];
- перечень ПДК_к (или ОБУВ_к) для всех выбрасываемых группой источников ЗВ, а также группы ЗВ однонаправленного вредного воздействия, взятые из нормативного документа [4];
- проектные параметры группы источников и характеристики внешней среды для наихудших условий, взятые из проекта рассматриваемого предприятия;



Рис. 1. Структурная блок-схема модели для группы точечных источников выбросов
Structural block diagram of a model for a group of point sources

Материалы по первым трем пунктам определяют исходные данные. Методика ОНД-86 [8] используется для определения поправок от группы точечных источников в измеренные концентрации, обусловленные отличием наихудших условий, для которых определены ПДК_{мрj}, от условий измерений. Предпоследние материалы необходимы для получения прогнозных числовых характеристик плотности распределения тех, ЗВ, выбрасываемых группой источников, для которых подфакельные измерения не производились, и для определения условий, при которых экологический риск достигает максимального значения. Все эти материалы объединяются совместно с математической моделью, в алгоритм по последнему пункту [9].

Анализ материалов показывает, что в модели можно выделить следующие взаимосвязанные блоки:

Блок 1. Входная база данных. Содержит все необходимые исходные данные.

Блок 2. Определение приведенных измеренных и прогнозных не измеряемых концентраций. Содержит определение:

- прогнозных числовых характеристик плотности распределения концентраций ЗВ при прогнозируемом максимальном экологическом риске;
- поправок в измеренные значения концентраций, учитывающие отличие действительных условий при измерениях от наихудших;
- определение приведенных измеренных концентраций и дополнение их прогнозными значениями тех ЗВ, для которых измерения не производились.

Блок 3. Определение числовых характеристик плотности распределения приведенных концентраций. Содержит статистическую обработку полученных в Блоке 2 концентраций для наихудших условий с целью оценки математического ожидания C_k^* приведенных концентраций k -х ЗВ, среднеквадратических отклонений случайного разброса концентраций σ_k и коэффициентов корреляции r_{kp} между концентрациями k -го и p -го ЗВ, а также расчет, этих прогнозных характеристик для не измеряемых концентраций и совместных (общих) числовых характеристик в случае наличия ЗВ, обладающих суммацией вредного действия. [9]

Блок 4. Определение фактических экологических рисков для человека в точке измерения концентраций. Определяется фактический экологический риск α для человека от загрязнения атмосферы группой точечных источников выбросов, как вероятность того, что концентрация хотя бы одного ЗВ в наихудших условиях превысит свои ПДК_{мрk}, а также частные экологические риски α_k от отдельных k -х ЗВ. При большом числе измерений производится также оценка фактического экологического рисков α , α_k по частоте превышения приведенными концентрациями своих ПДК_{мрk} [10-13].

Блок 5. Выходная база данных. Содержит исходные данные и искомые результаты расчетов, формы вывода информации на печать.

Результаты

С использованием полученной математической модели оценки экологического риска разработан алгоритм численного решения задачи. Получена численная модель взаимосвязи загрязнения атмосферного воздуха и экологического риска по данным под.

Научная новизна и практическая ценность

В ходе исследования с использованием данных подфакельных измерений определен фактический риск от проявления одновременного воздействия на человека выбросов загрязняющих атмосферу веществ от группы точечных источников промышленных предприятий в зависимости от концентраций загрязнителей.

Выводы

1. Сделана постановка задачи оценки экологического риска α для человека от группы точечных источников выбросов по данным подфакельных измерений при нормальном функционировании источников.

2. Как для одного точечного источника выбросов так и для группы источников загрязнения атмосферного воздуха экологический риск рассматривается как вероятность превышения в наихудших условиях, хотя бы одной k -ой концентрацией выбрасываемых ЗВ своей ПДК_{мрk}.

3. Разработана аналитическая математическая модель оценки риска для случаев, в которых производятся измерения всех концентраций выбрасываемых группой источников ЗВ или часть концентраций ЗВ не измеряется, с учетом суммации их вредного воздействия.

4. Для группы точечных источников математическая модель включает:

- исходные данные (результаты подфакельных измерений, характеристики ЗВ,
- санитарно-защитной и жилой зон, проектные параметры источников и характеристики внешней среды для наихудших условий);
- прогнозные зависимости концентраций ЗВ от проектных параметров группы точечных источников и характеристик внешней среды для источников с круглым и прямоугольным устьем, с горячими и холодными выбросами, предельно малыми опасными скоростями ветра;
- прогнозные зависимости по оценке составляющей экологического риска для человека от группы точечных источников выбросов;
- определению приведенных к наихудшим условиям измеренных концентраций ЗВ для группы точечных источников и их статистической обработке

с целью получения числовых характеристик плотности распределения системы концентрации выбрасываемых ЗВ (математических ожиданий, среднеквадратических отклонений и коэффициентов корреляции) с использованием данных подфакельных измерений;

- зависимости по прогнозируемому определению числовых характеристик плотности распределения не измеряемых (второстепенных) концентраций выбрасываемых ЗВ с целью учета их при определении рисков α и α_j ;

- зависимости по определению фактического экологического риска α , определяемого как многомерный интеграл вероятности от плотности

распределения концентраций с полученными числовыми характеристиками (при сравнительно малом числе испытаний) или по частоте превышения приведенными измеренными концентрациями своих ПДК_{мрк} (при большом числе испытаний);

- зависимости по определению фактических экологических рисков α_j от загрязнения атмосферы отдельными j -ми веществами;

5. С использованием полученной математической модели оценки риска разработан алгоритм численного решения задачи по оценке экологического риска от группы точечных источников.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска Хенли Э. Дж., Кумамото Х. // М.: Машиностроение, 1984. — 528 с.
2. Фалько В. В. Определение составляющей экологического риска от группы точечных источников. / В.В.Фалько, Л. Д. Пляжук, В. А. Долодаренко, // Вісник Сумського держ. ун-ту. Суми, 2008. – № 2. – С. 110–115.
3. Полторацкая В. Н. Оценка фактического экологического риска для человека и пути управления им на предприятиях / С. З. Полищук, В. Н. Полторацкая, В. В. Фалько // Новини науки Придніпров'я. – 2011. – №1, 2. – С. 97 – 101.
4. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентированные безопасные уровни воздействий загрязняющих веществ (ОБУВ) в атмосферном воздухе населённых мест. – Донецк: Укр НТЭК, 1998. – 139 с.
5. Полторацкая В.Н. Математическая модель оценки фактического экологического риска от точечного источника выбросов. - Збірник наукових праць національного гірничого університету – 2013. –№43. Дніпропетровськ – С. 157–161.
6. Дунин – Борковский И. В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике / И. В. Дунин – Борковский, Н. В. Смирнов // М.: ГИТТЛ, 1955. – 556 с.
7. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – М.: Гос. ком. СССР по гидрометеорологии, Мин. здрав. СССР, 1991. – 691 с.
8. ОНД - 86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 94 с.
9. Полторацкая В. Н. Методика оценки экологического риска для человека по данным подфакельных измерений / В. Н. Полторацкая, С. З. Полищук // Збірник статей VII Всеукраїнської науково-практичної конференції 15 грудня 2011 р. – Запоріжжя, 2011. – С. 328–331.
10. Полторацкая В. Н. Оценка загрязнения атмосферы города Днепропетровска от стационарных источников выбросов по данным измерений / С. З. Полищук, А. В. Полищук, В. Н. Полторацкая, Н. А. Чернобровкина // Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів: матеріали III Між. наук-прак. конф. м. Дніпропетровськ, 03–08 жовтня 2005 р. – С. 225–226.
11. Полторацкая В. Н. Алгоритм оценки составляющей экологического риска, обусловленной загрязнением атмосферного воздуха, по данным подфакельных измерений концентраций / В. Н. Полторацкая // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2007. –№12(119). – С. 36 – 48.
12. Фалько В. В. Алгоритм прогнозной оценки составляющей экологического риска для человека от точечного источника выбросов / Фалько В. В. // Вісник Сумського національного аграрного університету. – № 2 (18). – 2008. – С. 149–156.
13. Полторацкая В. Н. Оценка экологического риска на примере точечных источников выбросов предприятия ОАО «Днепрококс», г. Днепропетровск / С. З. Полищук, В. Н. Полторацкая, Е. А. Тимошенко // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2009. – Ч. 2, Вып. 48. – С. 218–225.

REFERENCES

1. Henley E.J., Kumamoto X. *Nadezhnost` technicheskikh sistem, ocenka riska* [Reliability of technical systems and risk assessment]. *Mashinostroenie* - [Engineering], 1984, 528 p. (in Russian).
2. Fal'ko V.V., Plyatsuk L.D., Dolodarenko V.A. *Opredelenie sostavlyayushey ekologicheskogo riska ot gruppi tochechnih istochnikov*. [Determining component of environmental risk from the group of point sources] *Visnik Sums'kogo derzh. un-tu. Sumi* [Bulletin of Sumy State. Univ. Sumy], 2008. no 2, pp. 110-115 (in Ukrainian).
3. Poltoratskaya V.N., Polischuk S.Z., Falco V.V. *Ocenka fakticheskogo ekologicheskogo riska dlya cheloveka, puti upravleniya im na predpriyatii* [Assessment of the actual environmental risk to humans and ways of management in enterprises] *Novini nauki Pridniprov'ya*. [News science Pridniprov'ya]. 2011. - №1, 2. - pp. 97 - 101. (in Ukrainian).
4. *Predel'no dopustimye koncentracii (PDK), orientirovannyye bezopasnyye urovni vosdeystviya (OBUV) v atmosfernom vozduhe naseleennykh mest* [Maximum permissible concentration (MPC), and oriented safe level of exposure pollutants (TSEL) in the ambient air of populated places]. Donetsk: Ukr NTPC, 1998, 139 p. (in Ukrainian).
5. Poltoratskaya V.N. *Matematicheskaya model` ocenki fakticheskogo ekologicheskogo riska ot tochechnogo istochnika vibrossov* [A mathematical model to assess the actual environmental risk from a point source emissions]. *Zbirnik naukovih prac' nacional'nogo gornichogo universitetu* [Proceedings of the National Mining University]. Dnepropetrovsk, 2013, no 43, pp. 157-161. (in Ukrainian).

6. Dunin I.V., Borkowski I.V. *Teoriya veroyatnostey, matematicheskaya statistika v tekhnike* [Probability Theory and Mathematical Statistics in the art]. M: GITTL, 1955. - 556 p. (in Russian).
7. RD 52.04.186-89. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery*. [RD 52.04.186-89. Control of air pollution Guide]. M.: Gos. kom. SSSR po gidrometeorologii, Min. zdrav. SSSR [M.: State. com. USSR for Hydrometeorology, Min. sensible. USSR], 1991, 691 p. (in Russian).
8. OND - 86. *Metodika rascheta koncentraciy v atmosfernom vozduhe vrednih veshchestv, soderzhashih v vybrosah predpriyatiy*. [The method of calculating the concentration in the air of harmful substances contained in industrial emissions]. L.: Gidrometeoizdat, 1987, 94 p. (in Russian).
9. Poltoratskaya V.N., Polishchuk S.Z. *Metodika oцenky ekologicheskogo riska dlya cheloveka po dannym podfakel'nykh nablyudenykh* [Methods of assessing the environmental risks to human measurements according to undertorch]. Zbirnik statej VII Vseukraїns'koї naukovo-praktichnoї konferencії [Collection of Articles VIII Ukrainian Scientific Conference December]. Zaporizhzhya, 2011, pp. 328-331. (in Ukrainian).
10. Poltoratskaya V.N., Polishchuk S.Z. *Ocenka zagryazneniya atmosfery goroda Dnepropetrovsk ot stacionarnykh istochnikov vibrosov po dannim izmereniy* [Evaluation of contamination of Dnepropetrovsk atmosphere from stationary sources of emissions from measurements]. *Problemi prirodokoristuvannya, stalogo rozvitku ta tekhnogennoi bezpeki regioniv: materialy III Mizh. nauk-prak. konf.* [Environmental issues, sustainable development and technological security regions: between materials III sciences - prac. Conf.] Dnepropetrovsk, 03-08 October 2005, pp. 225-226. (in Ukrainian).
11. Poltoratskaya V.N. *Algoritm oцenki sostavlyayushei ekologicheskogo riska, obuslovlennoy zagryazneniem atmosfernogo vozduha, po dannim podfakel'nykh izmereniy koncentraciy* [Algorithm assessment component of environmental risk due to air pollution, according to measurements of concentrations undertorch]. *Visnik Pridniprovs'koї derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi* [Herald Dnieper State Academy of Construction and Architecture]. 2007, no12 (119). p. 36 – 48. (in Ukrainian).
12. Falco V.V. *Algoritm prognoznoy oцenki sostavlyayushey ekologicheskogo line for the man turned from the source vibrosov* [Algorithm predictive assessment component of environmental risk to humans from a point source emissions]. *Visnik Sums'kogo nacional'nogo agrarnogo universitetu* [Bulletin of Sumy National Agrarian University]. 2008, no 2, pp. 149-156. (in Ukrainian).
13. Poltoratskaya V.N., Polishchuk S.Z. *Ocenka ekologicheskogo riska na primere tochechnykh istochnikov vibrosov predpriyatiya OAO "Dneprokoks", g. Dnepropetrovsk* [Environmental Risk Assessment on the example of the enterprise of point sources of emissions of "Dneprokoks" Dnepropetrovsk] *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, mechanical engineering]. 2009. Part 2, no 48, pp. 218-225. (in Ukrainian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром. біол. наук, проф. Г.Г. Шматковим (Україна), д-ром. техн. наук, проф. С.З. Поліщуком (Україна)