

**ГІПОТЕЗИ. НЕСТАНДАРТНІ МЕТОДИ РІШЕННЯ НАУКОВИХ ТА  
ІНЖЕНЕРНИХ ПРОБЛЕМ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

УДК 620.179.14

ПАНДАННА ЗОНА ШОРСТКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТУ

*Скицюк В. І., Діордіца І. М.*

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
м. Київ, Україна*

*У статті розглядається поняття панданної зони різального інструмента і деталі, що є зоною, у якій відбуваються процеси руйнування надлишкової маси та процеси торкання деталі вимірjuвальними інструментами. Метою роботи є обґрунтування явища виникнення панданної зони типових різальних інструментів у металообробці. Визначення поняття панданної зони інструмента є авторське дослідження. Оскільки інструмент виконує низку специфічних рухів у просторі, він має просторовий об'єм відповідно траєкторії руху, форма та параметри якого повинні відповідати технологічним задачам формотворення деталі. Якщо не виконуються ці умови, то верстат або не виконує свої технологічні завдання, або це призводить до аварійної ситуації. Тому виникає необхідність врахувати дефекти шорсткості, геометрію та ексцентриситет інструмента, оскільки неможливо передбачити ці параметри заздалегідь і провести дослідження панданної зони елементарних технологічних об'єктів, що мають чіткий математичний опис своєї геометрії.*

**Ключові слова:** мікро, макроповерхня деталі, панданна зона.

### **Вступ**

Велика кількість технологічних операцій зі складання приладів досить часто вимагає вираховування розмірних ланцюгів, точність обчислення яких фактично визначає кінцеву якість продукту виробництва. В основі таких ланцюгів є розмір деталей, які виконуються із певною кінцевою точністю. У надточному приладобудування це є дуже великою проблемою, оскільки кінцевим чинником, що впливає на точність визначення геометричних розмірів деталі, є шорсткість її поверхні. Наразі проблема криється у тому, що шорсткість поверхні є функцією нестабільної маси у просторі, який оточує той чи інший технологічний об'єкт (ТО). Саме у цьому прошарку, що має властивість руху, відбувається передача енергетичного потенціалу від одного об'єкту до іншого. Цей прошарок із нестабільною масою у просторі та часі має назву панданної зони. Отже, розглянемо, який вплив цей прошарок має на загальні розміри того чи іншого технологічного об'єкту.

### **Загальна постановка задачі**

Шорсткість, як параметр ТО, є дуже специфічною функцією геометрії поверхні. Якщо не вдаватися у подробиці, то у спрощеному вигляді - це переріз поверхні за нормаллю [1] (рис. 1). Водночас, перепад між лінією западин і лінією виступів  $R_{\max}$  необхідно вважати за панданну зону шорсткості. Зазвичай,

за [1] цей профіль вважається нерегулярним (стохастичним), хоч це і викликає перше протиріччя з тим, що всі без виключень процеси металообробки мають типово регулярний характер (точіння, фрезерування тощо). Водночас, лінія (рис. 1), що вказує на номінальний розмір, знаходиться або у межах  $R_{\max}$ , або поза ним. Це по-перше. І по-друге, її координата визначається суто математичним шляхом. Тобто, виникає невизначеність розміром у  $R_{\max}$ . Сама величина  $R_{\max}$  теж має невизначеність, оскільки повністю залежна від максимального виступу та мінімальної западини. Виникає цілком слушне запитання: де їх шукати серед мільйонів точок вимірювання ?

Наступною проблемою, яка виникає у цьому випадку, є визначення розміру базової довжини  $L$ . Згідно [1] це повинна бути абсолютно лінійна частина деталі на визначеній ділянці. Знову ж таки постає питання, де знайти таку ділянку – це по-перше, і по-друге – за якими методами. Методологія, яка пропонується сьогодні, вкрай незадовільна, оскільки орієнтування поверхні відбувається без врахування панданних зон метрологічних приладів.

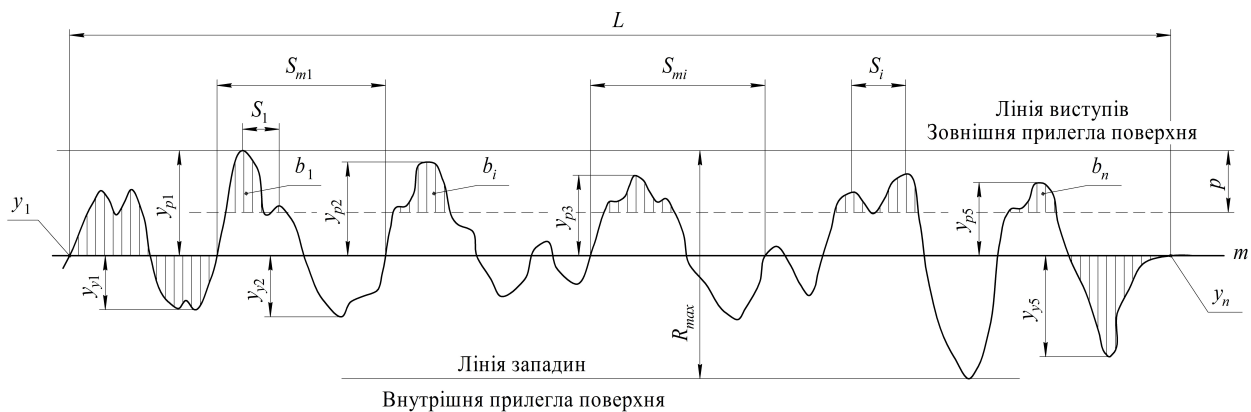


Рис. 1. Типова профілограма шорсткості поверхні та її параметри [1]

Якщо розглядати шорсткість більш достеменно на рівні наближення до атомарної побудови поверхні, то необхідно констатувати той факт, що мікро- та макropанданні зони поступово наближаються одна до одної.

Світлинні, отримані простим збільшенням поверхні із застосуванням спеціалізованих мікроскопів, дають, практично, той же результат, що і на рис. 1, але у форматі 3D, звідки добре видно, наскільки нерівномірне розташування атомів по поверхні. Отже, якщо орієнтуватися на ці факти, то поверхня будь-якого твердого тіла являє собою регулярно розташовані атоми (форма куляста). У такому випадку форма поверхні ніяк не може бути пласкою поверхнею, а має складний трикоординатний вимір. Якщо орієнтуватися на кульові поверхні, які створює форма атома як такого, то тут теж матимемо певну невизначеність. По-перше, атоми завжди знаходяться у коливальному стані, що породжує відповідну ПЗ у межах визначеного об'єму. По-друге, зовнішня електронна оболонка являє собою панданний простір, де рухаються електрони, ко-

ординати яких не можуть бути визначені з певних причин [3]. Тобто, у цьому випадку ми можемо орієнтуватися на уявну поверхню, що спирається на верхівки атомів. Але наявність руху атомів призведе до невизначеності місця розташування площини, внаслідок чого ми отримуємо певний прошарок, тобто панданну зону.

Отже, з усього сказаного вище, отримуємо основну проблему у визначенні координати відліку, тобто визначитися із поняттям фізичної поверхні ТО. На жаль, пошуки у літературних джерелах [3, 4, 5] вказують на те, що таке поняття зовсім відсутнє, оскільки у більшості випадків фігурує як суто суб'єктивне явище без будь-якого математичного підґрунтя. Тобто, якщо не існує поняття, що таке поверхня фізичного твердого тіла, то і поняття нуля відліку стає надто невизначеним.

У прикладній фізиці для дослідження поверхні використовується мікроскопія, як одна з методик дослідження. Останнім часом найбільше розповсюдження має тунельна мікроскопія (рис. 2) [2]. Але основна вада тунельної мікроскопії є те, що вона будує польову структуру поверхні, але спиратися на польову структуру є вкрай необачно через її нестабільність.

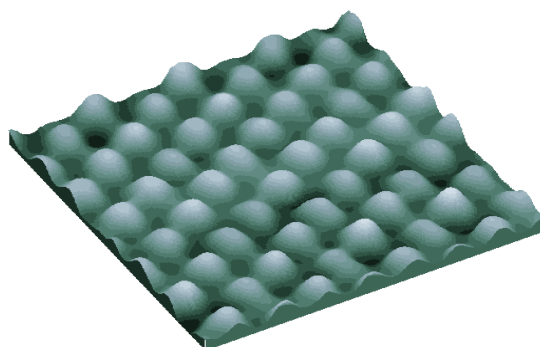


Рис. 2. Атомна структура поверхні високо-орієнтованої поверхні піролітичного графіту (Розмір зображення:  $17 \times 17 \times 2 \text{ \AA}^3$  [2])

Існує ще одна проблема, яка стосується мікро- та макропанданних зон ТО. Якщо ми по цей час розглядали ПЗ як приповерхнєве явище, то існує ще і проблема взаємодії двох ТО на рівні своїх мікро- та макропанданних зон, а саме їх поглинання, яке особливо важливе для метрології.

### **Ефект поглинання панданних зон технологічних об'єктів**

У попередніх розділах ми вже розглянули випадки взаємодії панданних зон ТО, коли через них відбувається передача енергії. Але, окрім цього явища, яке супроводжує процес торкання ТО, існує ще одне, яке впливає не стільки на конкретний розмір, скільки на суму цих розмірів, яка отримується внаслідок збирання того чи іншого приладу. Особливо цей чинник необхідно враховувати внаслідок вираховування розмірних ланцюгів, які є основою при тих чи інших технологічних процесах. Вплив макро- та макропанданних зон нібито і невели-

кий, але має властивість накопичення, який повністю не враховується у технічній літературі [1]. Ще більше ця проблема виникає у системі метрологічних вимірювань, як наприклад, ланцюги з'єднань плиток Йогансона як одної з базових систем визначення зразкових розмірів. Якщо проаналізувати все вищесказане теоретичне підґрунтя, то необхідно констатувати той факт, що оскільки подібне явище спостерігається для таких великих об'єктів, то воно повинно простежуватись і на мікрорівні. Оскільки це теоретична теза, яка є наслідком попередніх розвідок, то необхідно розглянути можливі явища, які можна буде спостерігати на мікрорівні. Визначитися з конкретною поверхнею вкрай важко, тому розглянемо це явище на засадах нормативних документів [1].

Отже, якщо ми маємо ТО1 та ТО2, які входять у контактування (рис. 3) і мають шорсткість поверхні, що описується згідно [1] у вигляді:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \quad (1)$$

або у спрощеному вигляді

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (2)$$

то матимемо наступні наслідки.

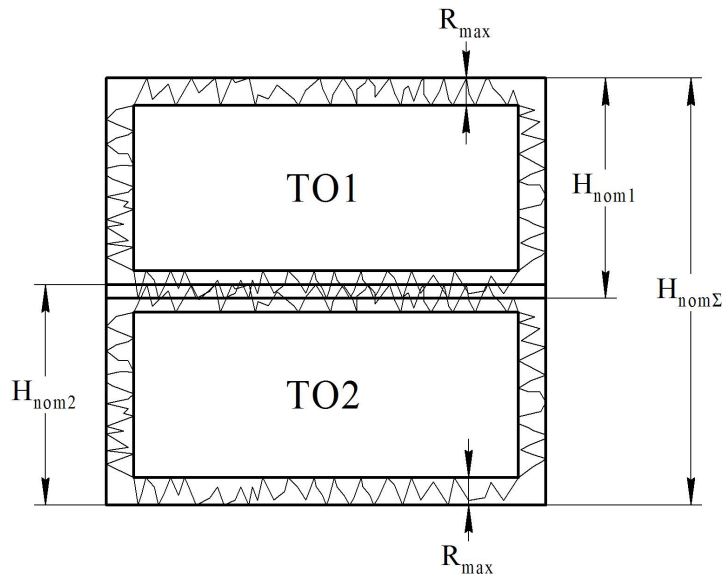


Рис. 3. Зменшення підсумкового розміру двох ТО внаслідок поглинання панданної мікрозони

Приймемо низку умов, які не мають протиріччя із [1].

По-перше, залежності (1) та (2) виконуються на всіх базових ділянках довжиною  $l$  та у межах контактуючих площин ТО1 та ТО2.

По-друге, величина  $R_{max}$  визначається згідно [1] (рис. 1), як  $h_{max} + h_{min}$ .

По-третє, розміри  $H_{nom1}$  та  $H_{nom2}$  визначаються за максимальними відхиленнями поверхні обох ТО.

Тобто розмір  $H_{nom1}$  має у своєму складі величину  $2R_{max}$  і  $H_{nom2}$  теж.

По-четверте, функція, яка дає опис шорсткості поверхні ТО1, тобто  $F_1(x)$ , така ж сама, як і  $F_2(x)$ , яка дає опис шорсткості поверхні ТО2, тобто

$$F_1(x) = F_2(x). \quad (3)$$

По-п'яте, величини  $R_{max}$  для ТО1 дорівнює  $R_{max}$  для ТО2.

Отже, за звичайною логікою загальний розмір  $H_{nom\Sigma}$  повинен дорівнювати сумі розмірів  $H_{nom1}$  та  $H_{nom2}$ , тобто

$$H_{nom\Sigma} = H_{nom1} + H_{nom2}. \quad (4)$$

Розглянемо, чи можна це вважати за достеменний факт.

Вочевидь, якщо функція шорсткості (1, 2) тотожна для ТО1 та ТО2, то підсумковий розмір дорівнюватиме

$$H_{nom\Sigma} = H_{nom1} + H_{nom2} - 2R_{max}. \quad (5)$$

Така ситуація може спостерігатися лише у ідеалізованому випадку, коли шорсткість обох поверхонь повністю співпадає. У реальності співпадіння шорсткостей вкрай маловірогідно, тому за основу краще прийняти наступні залежності для ТО1

$$R_{a1} = \int_0^l |y(x)| dx \quad (6)$$

та

$$R_{a2} = \int_0^l |y(x - \tau)| dx \quad (7)$$

для ТО2.

Величина  $\tau$  у виразі (7) характеризуватиме відносний зсув поверхні одна від одної і коливатиметься у межах

$$0 \leq \tau \leq l. \quad (8)$$

Для регулярної поверхні  $\tau$  може коливатися у межах довжини хвилястості профілю, тобто

$$0 \leq \tau \leq S_{mi}. \quad (9)$$

Розглянемо досить просту ситуацію, коли контактують два елементарних елементи шорсткості (рис. 4).

При такому елементарному контактуванні розмір сумісної панданної зони  $L$  буде повністю залежним від величини  $\tau$  та форми поверхні, тобто

$$L = R_{max} + \tau \operatorname{tg} \alpha. \quad (10)$$

У виразі (10) величини  $R_{max}$  та  $\operatorname{tg} \alpha$  є параметрами форми поверхні, величина  $\tau$  є параметром відносного зсуву ТО1 та ТО2.

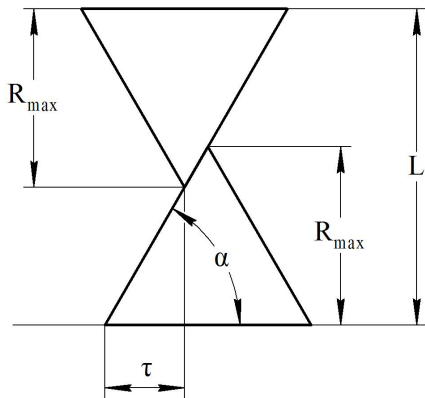


Рис. 4. Контактуювання двох елементарних елементів шорсткості

При контактуванні двох ТО завжди існують нормальні навантаження, але наявність шорсткості викликати появу тангенціальних сил, величина яких буде тісно пов'язана із величиною  $\tau$ . Чинником такої залежності буде площа тертя елементів, залежна від величини  $\tau$ . Тому, навіть за великої кількості елементарних елементів, обидва ТО будуть вишукувати таке розташування один відносно одного, поки система не досягне рівноваги [6].

У такому випадку завжди буде виконуватись умова

$$L < 2 R_{\max}, \quad (11)$$

що доводить явище поглинання панданних зон контактуючих технологічних об'єктів.

#### Фізико математичне підґрунтя ефекту поглинання панданних зон

Досить розповсюдженою ситуацією при розгляді геометрії ТО є перетворення функцій геометрії, шорсткості деталі, тобто (1, 2) у ряди Фур'є з наступною оцінкою якісних параметрів. У такому випадку загальний випадок у скороченому вигляді може бути розглянутий як спектр  $S(\omega_0)$  у наступній послідовності

$$S(x) = \frac{\alpha_0}{2} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(kx + \varphi_k), \quad (12)$$

де  $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ ,  $\text{tg} \varphi_k = \frac{a_k}{b_k}$ ,

або 
$$S(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{ikx}, \quad (13)$$

де 
$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-ikx} dx = \begin{cases} \frac{a_0}{2} & \text{при } k = 0 \\ \frac{1}{2} (a_k - ibk) & \text{при } k > 0 \\ \frac{1}{2} (a_k + ibk) & \text{при } k < 0 \end{cases} . \quad (14)$$

Водночас, вважається: будь-яке розкладання у ряд є достеменним, якщо функція форми  $f(x)$  необмежено наближається до функції  $S(x)$ , тобто

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-\pi}^{\pi} [f(x) - S_n(x)]^2 dx = 0. \quad (15)$$

У цьому виразі (15) кінцева ланка  $S_n(x)$  повинна виконувати залежність  $n \rightarrow \infty$ . Але у випадку технологічних операцій ця умова не є реальною, оскільки всі ТО мають кінцевий розмір та параметри, тобто необхідно орієнтуватися на  $n \rightarrow m$ . Це твердження ґрунтується на кінцевому розмірі атома (рис. 2). Наразі класична фізика [5], не дає формулювання того, що є шорсткістю поверхні на атомарному рівні. Якщо ми технологічно досягли шорсткості поверхні (як на рис. 2), то виникає запитання: яким чином шорсткість виміряти. У такому випадку нам необхідно мати інструмент вимірювання такого розміру, який буде достеменно реалізувати геометрію поверхні. Але, маючі такий інструмент, матимемо діаграму шорсткості із нескінченними розривами, оскільки у діагоналях між атомами просто нічого немає (рис. 2). У такому випадку члени  $S_m(x)$  та  $A_k$  функції  $f(x)$  мають можливість приймати значення нуля, половини діаметру атома або нескінченності. Оскільки розмір нульової товщини не може бути реалізованим, приймаємо кінцеву величину шорсткості у півдіаметра атома. При нескінченних величинах  $S_m(x)$  та  $A_k$  математичні залежності (12, 13) взагалі втрачають будь-який сенс, оскільки останні члени стають набагато більшими за саму функцію  $f(x)$ . Як наслідок залишається лише орієнтування на величину діаметра атома визначеної речовини. У такому випадку вираз (12) набуває наступного вигляду

$$S(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m A_k \sin[k(x - \tau) + \varphi_\tau], \quad (16)$$

де  $A_k$  коливаються у межах  $A_1 \leq A_k \leq \frac{d_A}{2}$ ,  $d_A$  - діаметр атома досліджуємого об'єкту.

Із (13) отримуємо:

$$S(x) = \sum_{-m/2}^{m/2} c_k e^{ik(x-\tau)}, \quad (17)$$

де

$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-l/2-\tau}^{l/2-\tau} f(x-\tau) e^{-ik(x-\tau)} dx, \quad (18)$$

при цьому величина  $\tau$  змінюється у межах залежності (8).

Якщо розглядати дві поверхні ТО, що контактують між собою, то відповідно середня квадратична похибка (ідеальний випадок) становитиме

$$\int_{-l/2}^{l/2} [f(x) - s_m(x)]^2 dx + \int_{-l/2+\tau}^{l/2-\tau} [f(x+\tau) - s_m(x+\tau)]^2 dx = \delta^2. \quad (19)$$

При вирішенні рівняння (19) скористаємося теоремами про середнє значення інтегральної функції [7]. Для спрощення позначимо наступне:

$$\int_{-l/2}^{l/2} [f(x) - s_m(x)]^2 dx = \int_{-l/2+\tau}^{l/2-\tau} u_1(x) dx$$
$$\int_{-l/2+\tau}^{l/2-\tau} [f(x-\tau) - s_m(x-\tau)]^2 dx = \int_{-l/2+\tau}^{l/2-\tau} u_2(x+\tau) dx. \quad (20)$$

Надалі, користуючись властивостями інтегральних функції, робимо наступні перетворення [7]:

$$\int_{l/2}^{l/2} u_1(x) dx = \mu_1 l, \quad (21)$$

де  $\mu_1$  задовольняє умові  $a \leq \mu_1 \leq b$ , тобто

$$\int_{-l/2+\tau}^{l/2-\tau} u_2(x-\tau) dx = \mu_2 (l-2\tau), \quad (22)$$

де  $\mu_2$  задовольняє умові  $(a+\tau) \leq \mu_2 \leq (b+\tau)$ .

Як наслідок, із підстановки (21) та (22) у (20) отримаємо наступне рівняння:

$$\mu_1 l + \mu_2 (l-2\tau) = \delta^2. \quad (23)$$

або після перетворень за умови, що  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ , отримуємо

$$\delta = \sqrt{2\mu(l-\tau)}. \quad (24)$$

Тобто, навіть при простому контактуванні об'єктів, на загальну похибку впливає величина  $\tau$ , яка у принципі не може дорівнювати нулю.

У випадку, коли величина  $\tau$  має повний вплив у рівнянні (23) між першим та другим членом, необхідно використовувати знак "-" як ознаку поглинання технологічної маси. У такому випадку із (23) та (24) отримуємо

$$\delta = \sqrt{2\tau\mu}, \quad (25)$$

ця залежність (25), як і попередня (24), вказує на те, що загальна похибка є функцією шорсткості поверхні та відносного зсуву  $\tau$ .

Отже, і розмір конкретної деталі, і загальний результат, є функцією відносного зсуву поверхонь одна відносно іншої.

### **Висновки**

Проведене дослідження доводить, що контактування ТО у будь-якій спосіб призводить до загального зменшення розміру складального ланцюга.

Особливість проведеного дослідження вказує на те, що у метрологічних вимірюваннях необхідно враховувати подібну ситуацію, оскільки вона однозначно впливає на кінцевий результат.



Ефект поглинання панданних зон контактуючих технологічних об'єктів, який доведено на фізико-математичному рівні, вказує на те, що підсумковий розмір торкання завжди буде менший за суму номінальних.

Як наслідок із усього вище обумовленого, необхідно переглянути теорію тертя одного технологічного об'єкта відносно іншого з огляду на енергетичні взаємодії панданних зон [8].

#### **Література**

1. Мягков В. Д. Допуски и посадки: Справочник в 2-х частях / В. Д. Мягков, М. А. Палей, А. Б. Романов, В. А. Брагинский; 5-ое изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отд., 1978. – 544 с., ил.
2. Яминский В. И. Взгляд в микромир: от атома и молекул – до живых клеток / И.В. Яминский. – Режим доступа: [http://www.nanoscopy.org/ebook/Pag09\\_12.html](http://www.nanoscopy.org/ebook/Pag09_12.html).
3. Епифанов В. В. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1965. – 276 с.
4. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М.: Физматгиз, 1968. – 940 с., ил.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела; пер. с 4-го амер. издания А. А.Гусева и А. В. Пахнева под. общей редакцией А. А.Гусева. Учебное руководство. – М.: Главн. ред. физ.-мат. лит.-ры изд-ва «Наука», 1978.
6. Павловський М. А. Теоретична механіка : підручн. – К.: Техніка, 2002. – 512 с., іл.
7. 7. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., исправл. / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
8. Крагельский И. В. Трение и износ 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.

*Надійшла до редакції  
31 жовтня 2013 року*

© Скицюк В. І., Діордіца І. М., 2014