

УДК 621.771

<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.04>

Гуляєв Ю.Г., Шифрін Є.І., Фролов Я.В.

Методика визначення катаючого радіуса при безоправочній поздовжній прокатці труб

Y. Gulyaev, Y. Shyfrin, Ya. Frolov

The rolling radius determining method for longitudinal tube rolling

Розроблена методика визначення співвідношення умовного і реального катаючих радіусів валків згідно з умов процесу редування труб у станах поздовжньої прокатки. При аналітичному визначенні катаючого радіуса при продольній прокатці в круглих калібрах (у тому числі, – при безоправочній поздовжній прокатці труб) часто використовують допущення, згідно з яким площина, яка розділяє контактну поверхню на зони випередження і відставання паралельні площині симетрії калібру. При використуванні цього допущення умовна нейтральна лінія – це просторова крива, паралельна площині симетрії калібру, а горизонтальна проекція умовної нейтральної лінії на перпендикулярну площину – це пряма, паралельна осі прокатки. Розрахований на підставі цього допущення катаючий радіус є умовним катаючим радіусом. Враховуючи те, що реальна границя зон випередження і відставання (реальна нейтральна лінія) представляє собою просторову криву, не паралельну площині симетрії калібру, а горизонтальна проекція реальної нейтральної лінії на перпендикулярну площину – це плоска крива. розроблено методику розрахунку катаючого радіуса на підставі розгляду умовної рівноваги заготовки під дією прикладених до неї сил. Розрахований на цій підставі катаючий радіус є дійсним катаючим радіусом. Виконані розрахунки величин дійсного і умовного катаючого радіуса при ідентичних умовах безоправочної прокатки труб. В результаті виконаних розрахунків встановлено, що в області реальних значень коефіцієнта тертя при редуванні труб ($f \in [0,25 - 0,5]$) величина коефіцієнта тертя практично не впливає на співвідношення дійсного та умовного катаючих радіусів. При прокатці з результирующим зовнішнім осьовим зусиллям, яке направлено по ходу прокатки, величина зовнішнього зусилля практично не впливає на співвідношення умовного і дійсного катаючих радіусів. При прокатці з результирующим зовнішнім осьовим зусиллям, яке направлено проти ходу прокатки зростання цієї величини зменшує расхождение між значеннями реального і умовного катаючих радіусів. Збільшення овальності калібру і товщини стінки труби призводить до зростання співвідношення дійсного і умовного катаючих радіусів. Якщо маємо збільшення радіуса валків, це співвідношення зменшується. Отримана апроксимуюча залежність для співвідношення реального і умовного катаючих радіусів валків дозволяє корегувати розрахунки швидкісних режимів прокатки залежно від реальних умов процесу.

Ключові слова: продольна прокатка, редування труб, катаючий радіус.

A generalized method for determining the rolling radius was developed. It based on analysis of the real form of the neutral line in the deformation zone. The assumption that the neutral plane is parallel to the rolling gauge plane of symmetry is mostly applied in analytical determination of the conventional rolling radius at longitudinal rolling in round gauges (including rolling reduction of pipes). According to that assumption, the horizontal projection of the conventional neutral line to the perpendicular plane is a straight line parallel to the axis of rolling. The true shape of border between the lead and lag zones (real neutral line) represents a spatial curve not parallel to the symmetry plane. And its horizontal projection onto the perpendicular plane is flat curve. The equation determining its shape on this plane can be determined by considering the condition the balance of the metal inside the deformation zone under the action of applied forces. The rolling radius calculated using that equation is called the real rolling radius. Presented in this study calculations show no significant influence of the friction factor f on the ratio within f values range 0.25...0.5. Such range meets the real conditions at longitudinal pipe rolling. External axial force directed forwards to rolling direction also don't change the ratio significantly. Over against, the backward directed external force and greater rolls diameter lead to alignment of conventional and real rolling radiuses. Increase of the diameter reduction as well as an increasing of the relative wide of the groove elevates the ratio. Same effect provides the higher wall thickness in the entrance to deformation zone. Empiric equation for ratio determining at mostly used conditions of longitudinal pipe rolling obtained in this study allows to correct rolls drive velocity to provide best stress conditions inside the deformation zone.

Key words: longitudinal tube rolling, stretch-reduction, rolling radius, tube rolling die.

Вступ. Реально межа зон випередження і відставання (реальна нейтральна лінія) при поздовжній прокатці в круглих калібрах (у тому числі, – при безоправочній поздовжній прокатці труб) представляє собою просторову криву $y_n = y_n[x_n(z), z]$, горизонтальна проекція якої на площину XOZ – є плоска крива $x_n = x_n(z)$ (мал. 1). Аппликату z_n , яка відповідає умові $x_n(z_n) = 0$, називають нейтральною точкою [1]. Якщо використовують циліндричну систему координат, то

кут, який відповідає умові $x_n(\theta_n) = 0$, називають нейтральним кутом. Швидкість прокатки v_1 визначається величиною катаючого радіуса R_{kat} яка пов'язана з величиною z_n умовою (рис. 1)

$$R_{kat} = R_u - \sqrt{R_{kzn}^2 - z_n^2}, \quad (1.1)$$

де R_u – ідеальний радіус валка (відстань від вісі валка до вісі прокатки);

$$R_{kzn} = R_{kz}(z_n) \quad \text{– радіус калібру для}$$

Гуляєв Юрій Геннадійович – д.т.н., проф. ТОВ «Інтерпайп «Ніко-Тьюб»
Шифрін Євген Ісайович – д.т.н., проф. НМетАУ,
Фролов Ярослав Вікторович – д.т.н., проф. НМетАУ

Gulyaev Yuriy - d.t.s., prof. Nico-Tube Interpipe LLC
Shyfrin Eugene - d.t.s., prof NmetAU,
Frolov Yaroslav - d.t.s., prof NmetAU

нейтральної точки (при $z = z_n$).

При аналітичному визначенні катаючого радіуса R_{kat} часто [2-4 та ін.] використовують припущення, яке було запропоновано В.П. Анісіфоровим та ін. в роботі [5], відповідно з яким площина, яка розділяє контактну поверхню на зони випередження і відставання паралельна площині симетрії калібру XOY . При використанні цього припущення умовна нейтральна лінія – це просторова крива, паралельна площині XOY , а горизонтальна проекція умовної нейтральної лінії на площину XOZ – це пряма, паралельна вісі прокатки OX (рис. 2). Апликату z_{ny} точки перетину умовної нейтральної лінії з площиною центрів валків YOZ назвемо умовною нейтральною точкою; відповідно, умовним катаючим радіусом назвемо величину

$$R_{katy} = R_u - \sqrt{R_{kz}(z_{ny})^2 - z_{ny}^2}. \quad (1.2)$$

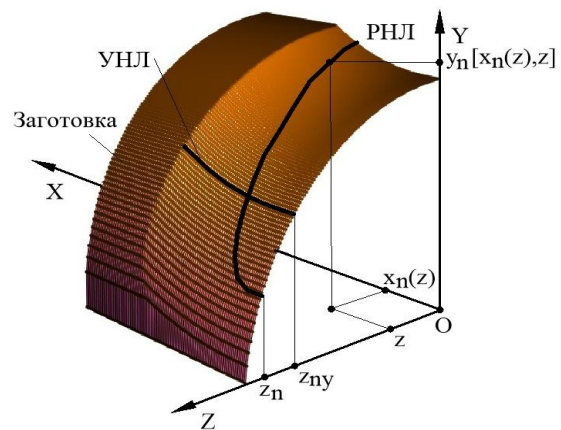


Рисунок 1 - Реальна нейтральна лінія (PHЛ) і умовна нейтральна лінія (УНЛ)

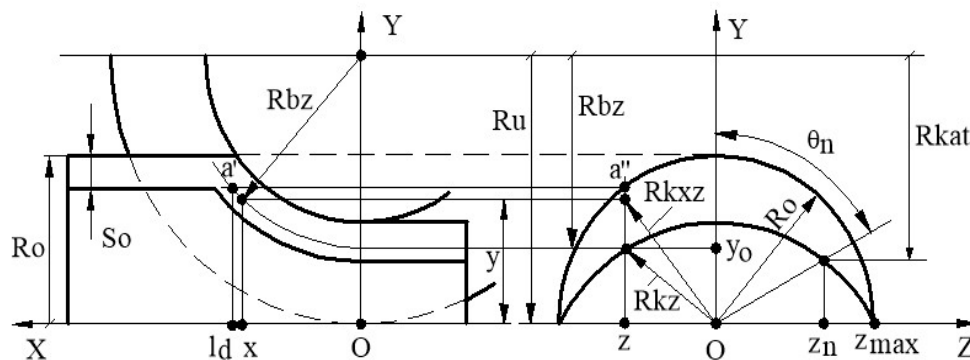


Рисунок 2 - Схема очага деформації

Мета роботи. Зіставити розрахункові значення реального (R_{kat}) і умовного (R_{katy}) катаючого радіусів при редуванні труб.

Прийняті припущення. При визначенні величин R_{kat} и R_{katy} прийняті такі припущення:

Розглядаємо процес прокатки *циліндричної* (неовалізованої) труби в валках з *однаковими* геометричними параметрами, які обертаються з *однаковими* кутовими швидкостями ω_B (аналог процесу *простой поздовжньої прокатки смуги* [6]).

Як і при аналізі умов *простой поздовжньої прокатки смуги* приймаємо умову відсутності *поперечної* течії металу по поверхні калібру (відсутність уширення).

Вважаємо справедливою гіпотезу плоских перетенів: поточна по довжині очага деформації витяжка μ усереднюється для кожного діаметрального перетину і не залежить від координат y и z ; $\mu = \mu(x)$.

Змінення товщини стінки заготовки ΔS_0 в процесі деформації є незначним зрівняно з товщиною стінки S_0 [7]: $\frac{\Delta S_0}{S_0} \approx 0$.

Нормальні контактні напруження p розподілені по контактній поверхні металу з валком *рівномірно*, $p = p_{cp}$.

Нормальні (p) і касательні (τ) контактні напруження зв'язані між собою законом тертя Г.Амонтона – Ш.Кулона, $\tau = f p_{cp}$ (тут f – коефіцієнт зовнішнього контактного тертя).

Постановка задачі. Швидкість відносного ковзання металу по поверхні валка складає величину

$$\Delta v = v_c - v_{bz}, \quad (2)$$

де $v_c = v_x \sqrt{1 - \left[\frac{x}{R_{bz}}\right]^2}$ – проекція вектора швидкості руху заготовки в напрямку вісі прокатки v_x на напрямку вектора лінійної швидкості поверхні валка v_{bz} ;

$$v_x = \frac{v_1 \mu_x}{\mu_\Sigma} - \text{швидкість руху заготовки в напрямку вісі прокатки};$$

$v_1 = \omega_B R_{kat}$ или $v_1 = \omega_B R_{katy}$ – швидкість руху заготовки в напрямку вісі прокатки в площині центрів валків (при $x = 0$);

$$\mu_x = \frac{2R_0 - S_0}{2R_{mxcp} - S_0} - \text{поточна витяжка по довжині очага деформації};$$

μ_Σ – сумарна (обща) витяжка;

S_0, R_0 – товщина стінки і радіус труби до деформації;

$$R_{mxcp} = \frac{1}{z_{max}} \left(\int_0^{z_{max}} R_{mx} dz \right) - \text{середній радіус заготовки в конкретному діаметральному перетені зони деформації з координатою } x;$$

$$z_{max} = b \sin \frac{\pi}{n} - \text{максимальне значення апплікати } z \text{ в межах калібру};$$

n – кількість валків, які утворюють калібр;

b – ширина калібру;

$$R_{mx} = \begin{cases} R_x & \text{если } R_0 \geq R_x \\ R_0 & \text{если } R_0 < R_x \end{cases} - \text{поточне по очагу деформації значення радіуса заготовки (тут}$$

$$R_x = \sqrt{\left[R_u - \sqrt{(R_u - y_0)^2 - x^2} \right]^2 + z^2};$$

$y_0 = y_0(z)$ – ордината точки профілю калібру валка на виході з очага деформації (при $x = 0$), яка визначається рівнянням профілю калібру;

z – аппликата точки профілю калібру валка на виході з очага деформації;

$$R_{bz} = R_u - \sqrt{R_{kz}^2 - z^2} - \text{поточна по ширині калібру величина радіуса валка};$$

$$R_{kz} = R_{kz}(z) - \text{рівняння профілю калібру.}$$

Касательні контактні напруження τ мають напрямок, протилежний швидкості Δv . Тому в зоні випередження, де $\Delta v > 0$, елементарні сили тертя $dT_{op} = \tau dF_{op}$ (тут dF_{op} – елементарна ділянка контактної поверхні в зоні випередження), прикладені до заготовки, спрямовані проти ходу прокатки. В зоні відставання, де $\Delta v < 0$, елементарні сили тертя $dT_{ot} = \tau dF_{ot}$ (тут dF_{ot} – елементарна ділянка контактної поверхні в зоні відставання), прикладені до заготовки, спрямовані по ходу прокатки.

Очевидно, що горизонтальна проекція dP_x елементарних сил нормального тиску $dP = p dF$ (тут dF – елементарна ділянка контактної по-

верхні) спрямована проти ходу прокатки на усій контактній поверхні.

З врахуванням прийнятих припущень умова рівноваги заготовки під дією прикладених до неї на всій контактній поверхні ($F_\Sigma = F_{op} + F_{ot}$) в напрямку вісі прокатки OX сил записується таким чином

$$T_{op} - T_{ot} + P_x + Q = 0, \quad (3)$$

де $T_{op} = \iint_{(F_{op})} m_x dF$ – результуюче зусилля в напрямку вісі прокатки від елементарних сил тертя dT_{op} в зоні випередження;

$$T_{ot} = \iint_{(F_{ot})} m_x dF - \text{результуюче зусилля в напрямку вісі прокатки від елементарних сил нормального тиску } dT_{ot} \text{ в зоні відставання};$$

$$P_x = \iint_{(F_\Sigma)} p n_{px} dF - \text{результуюче зусилля в напрямку вісі прокатки від елементарних сил тертя } dP \text{ в зоні відставання};$$

n_{tx}, n_{px} – направляючі косінуси проекцій на вісь OX елементарних сил тертя dT_{ot}, dT_{op} і сил нормального тиску dP відповідно;

Q – зовнішнє осьове зусилля, прикладене до заготовки.

Складові P_x и Q в рівнянні (3) не залежать від положення нейтральної лінії в очазі деформації. Величина Q визначається характером зовнішнього впливу на заготовку: при $Q > 0$ результуюче зовнішнє осьове зусилля, прикладене до заготовки, спрямоване проти ходу прокатки; при $Q < 0$ – по ходу прокатки. При $p = p_{cp}$ величина P_x визначається з рівняння

$$P_x = 4 p_{cp} F_v, \quad (4)$$

де $F_v = \int_0^{z_{max}} \left(R_{bz} - \sqrt{R_{bz}^2 - l_d^2} \right) dz$ – проекція площі контактної поверхні на площину центрів валків YOZ ;

$$l_d = \sqrt{R_{bz}^2 - \left(R_u - \sqrt{R_0^2 - z^2} \right)^2} - \text{горизонтальна проекція задньої межі очага деформації на площину } XOZ.$$

Розрахунок умовного катаючого радіуса. При розрахунку умовного катаючого радіуса значення складових T_{op} и T_{ot} в рівнянні (3) визначаються наступним чином:

В розрахунках приймали $n = 2$, $R_0 = b = 25 \cdot 10^{-3}$ м і варіювали значення λ_k , f , $\bar{R} = \frac{R_u}{R_0}$, $\bar{T} = \frac{S_0}{R_0}$ і $\bar{Q} = \frac{Q}{P_x}$. Розбіжність між значеннями реальних R_{kat} і умовних R_{katy} катаючих радіусів оцінювали співвідношенням $U = \frac{R_{kat}}{R_{katy}}$.

Зіставлення розрахункових значень реального і умовного катаючих радіусів. В результаті виконаних розрахунків встановлено, що в області реальних значень коефіцієнта тертя при редикуванні труб ($f > 0,25 - 0,5$ [8]) величина f практично не впливає на співвідношення U (Рис. 4).

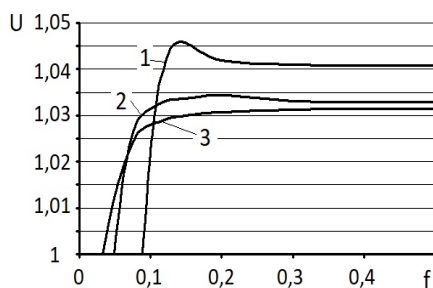


Рисунок 4 - Розрахункові залежності $U = U(f)$ при $\lambda_k = 1,05$, $\bar{Q} = 0$, $\bar{T} = 0,45$:
1 – 2; 2 – $\bar{R} = 5$; 3 – $\bar{R} = 10$

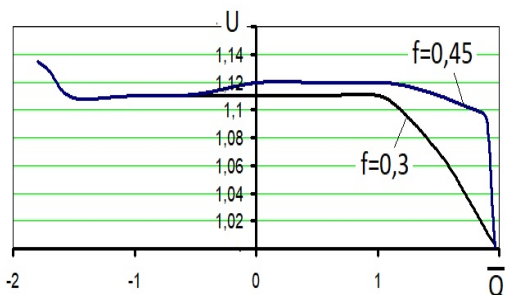


Рисунок 5 - Розрахункові залежності $U = U(\bar{Q}, f)$ при $\lambda_k = 1,15$, $\bar{T} = 0,45$

При прокатці з результуючим зовнішнім осьовим зусиллям Q , спрямованим по ходу прокатки ($Q < 0$) величина Q практично не впливає на співвідношення U . При прокатці з результуючим зовнішнім осьовим зусиллям Q , спрямованим проти ходу прокатки ($Q > 0$) зростання величини Q зменшує розбіг між значеннями реального і умовного катаючих радіусів (мал. 5).

Збільшення овальності калібра λ_k і відносної товщини стінки \bar{T} призводить до зростання співвідношення U (рис. 6). З зростанням відносного радіуса валків \bar{R} співвідношення U зменшується (рис. 6).

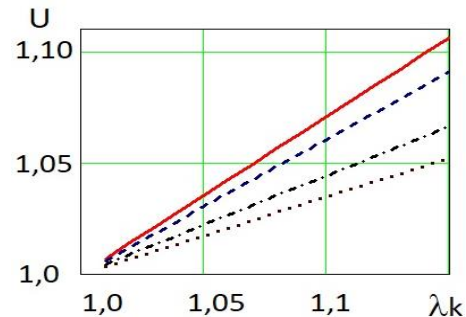


Рисунок 6 - Розрахункова залежність $U = U(\lambda_k, \bar{T})$ при $f = 0,375$, $\bar{Q} = 0$, $\bar{R} = 2$:
 $\bar{T} = 0,4$ – сплошна лінія; $\bar{R} = 2$, $\bar{T} = 0,1$ – пунктир;
 $\bar{R} = 10$, $\bar{T} = 0,4$ – штрих-пунктир; $\bar{R} = 10$, $\bar{T} = 0,1$ – крапки

Обробка розрахункових даних по алгоритму, запропанованому в роботі [9], дозволило отримати апроксимуючу залежність

$$U = 1 + (\lambda_k - 1) \cdot (0,3216 \bar{T} + 0,739) \cdot (\bar{R})^{0,1856 \bar{T} - 0,3659} \quad (11)$$

Таким чином, якщо катаючий радіус розрахований по формулі (1.2) як умовний катаючий радіус R_{katy} , його величину можливо скорегувати відповідно з залежністю $R_{kat} = UR_{katy}$.

Результати цього дослідження були використовані при розрахунках швидкісних режимів прокатки в калібрувальних і редуційних станах ТОВ «Інтерпайп Ніко-Тьюб».

Висновки.

Розроблена узагальнена методика розрахунку катаючого радіуса R_{kat} , заснована на аналізі реальної форми нейтральної лінії в очазі деформації.

Розглянуто окремий випадок узагальненої методики, в якому нейтральна лінія лежить в площині, паралельній вісі прокатки, а розрахунковий катаючий R_{katy} радіус є умовним.

Розраховані і зіставлені величини реальних R_{kat} і умовних R_{katy} катаючих радіусів при прокатці в овальних калібрах.

Отримана апроксимуюча залежність для корегування розрахункових значень умовного катаючого радіуса.

Бібліографічний опис

1. Гуляев Ю.Г., Шифрин Е.И., Николаенко Ю.Н. Анализ условий захвата при продольной прокатке в круглых калибрах / В сб. «Материалы X Международной конференции «Молодые учёные 2019 – от теории к практике»». – Днепро: НМетАУ, 2019. – С. 24-27.

- Fazan B., Blain P. Le Laminage des tubes sur Laminaires reducteurs – etireurs // Revue de Metallurgie. – 1967. – №3. – S. 209-225.
- SMS Meer Technische Dokumentation / Verlag Nr. 276/00186602/50/22-176. – 92 S.
- The Procedure of Determination of a Maximum Rolling Pressure in the Continuous Plugless Tube Rolling Process / Gulyaev G.I., Gulyaev Y.G., Shifrin Y.I., Kvitka N.Y. – The materials of International Conference of New Developments in Long and Forged Products Proceedings. Winter Park, Colorado, 2006. – P. 127-132.
- Исследование процесса редуцирования труб с натяжением: Отчет о НИР / Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения, Украинский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности – №11-56-1; Инв. № НР-573. – М. – Днепропетровск, 1956. – 123 с.
- Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением: Учебник. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.
- Технология непрерывной безоправочной прокатки труб / Г.И.Гуляев, П.Н.Ившин, И.Н.Ерохин и др.: Под ред. Г.И. Гуляева – М.: Металлургия, 1975. – 264 с.
- Способ определения коэффициента внешнего трения при продольной безоправочной прокатке труб: А. с. 1731309 СССР, МКИ В21В 17/14 / Ю.Г. Гуляев, Г.И. Гуляев, В.М. Друян и др. (СССР). – № 4709950/27: Заявл. 26.06.89; Опубл. 07.05.92, Бюллетень №17. – 4 с.
- Алгоритм статистической обработки эмпирических данных / Ю.Г. Гуляев, Э.А. Максимова, М.З. Володарский, А.Г. Карпов. – Доклады АН УССР, сер. А, №5, 1985. – С. 65-68.

References

- Gulyaev Yu.G., Shifrin E.I., Nikolaenko Yu.N. Analiz uslovij zahvata pri prodolnoj prokatke v kruglyh kalibrah / V sb. «Materialy N Mezhdunarodnoj konferencii “Molodye uchyonye 2019 – ot teorii k praktike”». – Dnepr: NMetAU, 2019. – S. 24-27.
- Fazan B., Blain P. Le Laminage des tubes sur Laminaires reducteurs – etireurs // Revue de Metallurgie. – 1967. – №3. – S. 209-225.
- SMS Meer Technische Dokumentation / Verlag Nr. 276/00186602/50/22-176. – 92 S.
- The Procedure of Determination of a Maximum Rolling Pressure in the Continuous Plugless Tube Rolling Process / Gulyaev G.I., Gulyaev Y.G., Shifrin Y.I., Kvitka N.Y. – The materials of International Conference of New Developments in Long and Forged Products Proceedings. Winter Park, Colorado, 2006. – P. 127-132.
- Issledovanie processa reducirovaniya trub s natyazheniem: Otchet o NIR / Vsesoyuznyj nauchno-issledovatel'skij i proektno-konstruktorskij institut metallurgicheskogo mashinostroeniya, Ukrainskij nauchno-issledovatel'skij i konstruktorsko-tehnologicheskij institut trubnoj promyshlennosti – №11-56-1; Inv. № NR-573. – М. – Dnepropetrovsk, 1956. – 123 s.
- Gromov N.P. Teoriya obrabotki metallov davleniem: Uchebnik. – М.: Metallurgiya, 1978. – 360 s.
- Tehnologiya nepreryvnoj bezopravochnoj prokatki trub / G.I.Gulyaev, P.N.Ivshin, I.N.Erohin i dr.: Pod red. G.I. Gulyaeva – М.: Metallurgiya, 1975. – 264 s.
- Sposob opredeleniya koefficienta vneshnego treniya pri prodolnoj bezopravochnoj prokatke trub: A. s. 1731309 SSSR, MKI V21V 17/14 / Yu.G. Gulyaev, G.I. Gulyaev, V.M. Druyan i dr. (SSSR). – № 4709950/27: Zayavl. 26.06.89; Opubl. 07.05.92, Byulleten №17. – 4 s.
- Algoritm statisticheskoy obrabotki empiricheskikh dannyh / Yu.G. Gulyaev, E.A. Maksimova, M.Z. Volodarskij, A.G. Karpov. – Doklady AN USSR, ser. A, №5, 1985. – S. 65-68.

Стаття поступила 10.01.2019