

УДК 539.3
UDC 539.3

АНАЛОГІЯ ДИНАМІКИ КОЧЕННЯ ЕЛІПСОЇДНОГО ДОЛОТА Й ОБЕРТАННЯ КЕЛЬСЬКИХ КАМЕНІВ

Шевчук Л.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна

ANALOGY BETWEEN ELLIPSOIDAL BIT ROLLING AND ROTATION OF CELTIC STONES

Shevchuk L.V., Ph.D, National Transport University, Kyiv, Ukraine

АНАЛОГИЯ ДИНАМИКИ КАЧЕНИЯ ЭЛЛИпсоИДНОГО ДОЛОТА И ВРАЩЕНИЯ КЕЛЬТСКИХ КАМНЕЙ

Шевчук Л. В., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Постановка проблеми.

Як встановлено експериментальними і теоретичними дослідженнями, вільне обертання продовговуватих еліпсоїдних тіл з малими геометричними чи масовими дефектами (кельтських каменів) має тенденцію зміни напрямку їх обертання. Аналогічні ефекти є типовими і для бурильних доліт. Вони також можуть виконувати прямі або зворотні коливання кружляння та змінювати їх напрями, описуючи траєкторію в формі багатопелюсткових квіток, що вирізають багаточасткові поперечні перерізи бурильної колони [1]. Однак, на відміну від кельтських каменів, долота можуть мати різну геометрію (включаючи витягнуті та сплюснені еліпсоїди), вони не є вільними і приєднані до пружної колони, вони обертаються з наперед заданою швидкістю ω і змінюють напрям своїх осей відповідно з пружними згинаннями осі бурильної колони і її нахилами при вібрації[2-4].

Виклад основного матеріалу.

Щоб виявити основні причини, які впливають на форми руху долота дном свердловини, розглянемо найпростіші схеми неголономного кочення по площині еліпсоїдного тіла обертання, приєданого до пружного стержня, який обертається з кутовою швидкістю ω_0 . Для наочності виділимо стани, в яких площина CDG нахилу долота збігається з площиною XOZ (рис. 1). Тоді, якщо еліпсоїд витягнутий і кути $u'(C)$, $v'(C)$ нахилу його осі до вертикалі OZ додатні, то в даний момент часу швидкості переміщення точки $G(v_G)$ дотику долота з площиною π і вершини $D(v_D)$ еліпсоїда паралельні осі OY і долото рухається навколо колони у напрямі її обертання (рис. 1, а). Тому цей режим відповідає ефекту прямого кружляння. Проте ситуація змінюється, якщо переміщення $u(C)$, $v(C)$ додатні, але кути $u'(C)$, $v'(C)$ від'ємні (рис. 1, б). У цьому випадку швидкості v_D , v_G змінили свої напрями на протилежні і долото перекочується навколо колони в напрямі, протилежному до її обертання, здійснюючи режим оберненого кружляння.

Ще складнішою є кінематика руху сплюсненого долота, якщо його вершина D і точка дотику G розташовані по різні боки від осі колони. В цьому випадку, залежно від знаку кутів $u'(C)$, $v'(C)$, вершина D може рухатися у напрямі обертання, тоді як точка дотику G в зворотному (рис. 1, в) або, навпаки, точка D може переміщатися у напрямі обертання, а точка G в протилежному напрямі (рис. 1, г для оберненого кружляння).

Оскільки в реальних умовах на долото, яке має форму еліпсоїда, діють сили і моменти з боку пружної колони, що коливається, воно може постійно переходити від однієї кінематичної схеми, представленої на рис. 1, до іншої, змінюючи напрямок кругового руху, як це відбувається з кельтськими каменями. У складніших випадках, коли ці зміни напрямку відбуваються багаторазово, траєкторії руху точок долота можуть описувати складні фігури, в тому числі фігури, які нагадують багатопелюсткові квіти.

Запропонована модель дозволяє пояснити одну характерну особливість процесу кружляння, яка полягає в тому, що воно може приймати найбільш деструктивні режими, при яких кутова швидкість оберненого кружляння суттєво перевищує швидкість ω обертання бурильної колони і може досягати до 5 – 30-кратної величини [6-9]. Для підтвердження цієї можливості звернемося до рисунка 1, в. У розглянутий момент долото перекочується з кутовою швидкістю ω_r відносно горизонтальної осі, яка проходить через миттєвий центр швидкостей G . Нехай C є центром кривизни

перетину поверхні долота площиною, яка містить точку G і є нормальною до вектора ω_τ , а r – радіус-вектор нормалі, побудований у точці G . Тоді її швидкість v_c перпендикулярна площині XOY і дорівнює величині

$$v_c = \omega_\tau \times r = \omega_\tau \cdot r \cdot j.$$

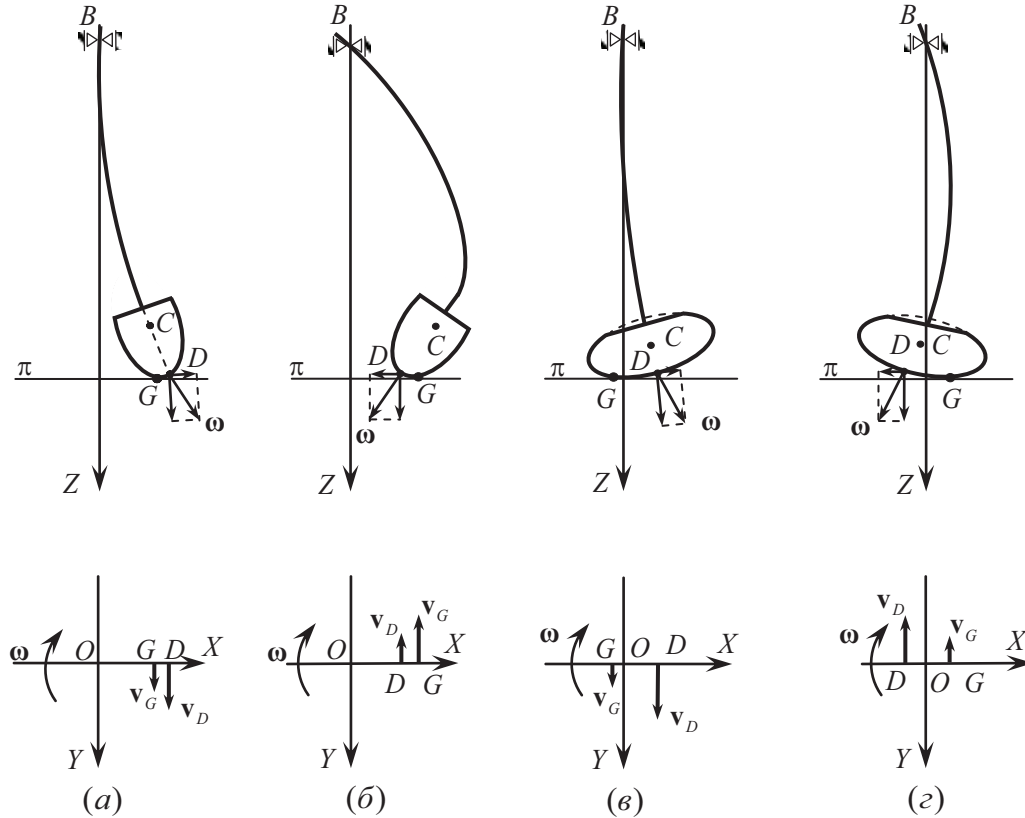


Рисунок 1 – Кінематичні схеми прямого і зворотного неголономного кочення доліт еліпсоїдальної форми

Як випливає із роботи [4], швидкість v_G миттєвого центра швидкостей долота дорівнює нулю, однак її слід на площині π рухається зі швидкістю

$$v_G^\pi = v_c.$$

Тоді

$$v_G^\pi = \omega_\tau \cdot r$$

і кутова швидкість кружляння ω^{wh} долота обчислюється за формулою

$$\omega^{wh} = \frac{v_c^\pi}{d} = \frac{\omega_\tau \cdot r}{d}, \tag{1}$$

де d – відстань між точкою G і віссю OZ . Очевидно, що ω^{wh} збільшується зі зменшенням d , однак не до нескінченності, оскільки ω_τ також зменшується. Важливо відмітити також, що швидкість кружляння в рівнянні (1) залежить від радіуса r , який малий для витягнутих доліт і великий для сплюснутих. У зв'язку з цим можна очікувати, що сплюснуті долота більш схильні до швидкого кружляння в порівняно з поздовжніми долотами.

Кінематика складного руху центра долота C стає більш наглядною, якщо його вивчати в системі координат $Oxyz$, що обертається (рис. 2). У цьому випадку вектор відносної швидкості v' має

декартові компоненти $\dot{x}\mathbf{i} = \dot{x}\mathbf{i}$, $\dot{y}\mathbf{j} = \dot{y}\mathbf{j}$, тому вона може бути виражена через окружну (\mathbf{v}_{cir}^r) і радіальну (\mathbf{v}_{rad}^r) компоненти у відповідній полярній системі координат. Тоді абсолютна швидкість (\mathbf{v}_C^{abs}) точки C може бути представлена виразом

$$\mathbf{v}_C^{abs} = \mathbf{v}^e + \mathbf{v}^r, \quad (2)$$

де \mathbf{v}^e – вектор переносної швидкості, який обчислюється за формулою

$$\mathbf{v}^e = \boldsymbol{\omega} \times (x\mathbf{i} + y\mathbf{j}).$$

Таким чином, якщо вектори \mathbf{v}^e і \mathbf{v}_{cir}^r орієнтовані в одному напрямі, то долото перекочується, обганяючи обертання бурильної колони. Якщо вектори \mathbf{v}^e і \mathbf{v}_{cir}^r мають різні напрями, то швидкість перекочування долота відстає від швидкості обертання бурильної колони при $|\mathbf{v}^e| > |\mathbf{v}_{cir}^r|$. Воно здійснює чисте обертання без перекочування, коли $|\mathbf{v}^e| = |\mathbf{v}_{cir}^r|$ і перекочується в напрямку, протилежному обертанню БК, коли $|\mathbf{v}^e| < |\mathbf{v}_{cir}^r|$.

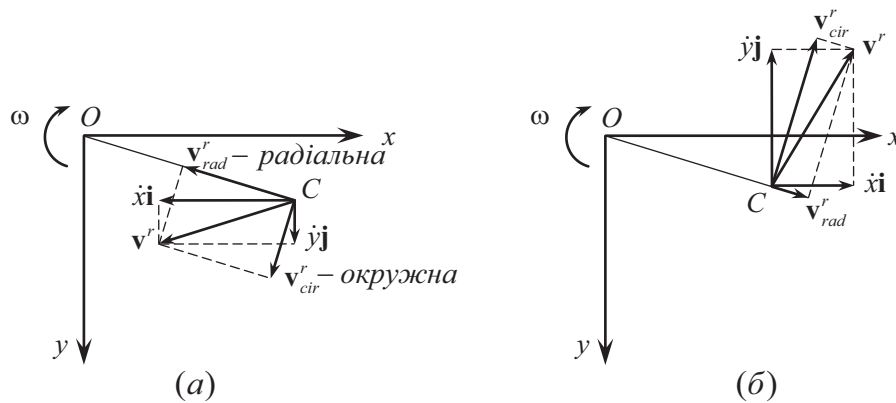


Рисунок 2 – Вид зверху на кінематичні схеми орієнтації вектора відносної швидкості \mathbf{v}^r

У зв'язку з тим, що на практиці долото еліпсоїдальної форми піддається дії пружних сил і моментів від бурильної колони, що коливається, воно може постійно переходити від однієї кінематичної схеми, представленої на рисунках 1 і 2, до іншої, змінюючи при цьому напрям її обертального руху, як це буває з кельтськими каменями. У складніших випадках, коли ці зміни напрямів повторюються багаторазово завдяки пружним коливанням БК, траєкторії руху центра долота можуть нагадувати більш складні фігури, які зблизька схожі, як відмічено вище, на багатопелюсткові квіти.

Результати досліджень.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що режим самозбудження даних автоколивань і їхні форми значною мірою залежать від згинальної жорсткості бурильної колони, значень T , M_z , а також геометрії контактуючих поверхонь долота і свердловини. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що вибираючи різні значення цих параметрів можна як стабілізувати, так і дестабілізувати коливання кружляння.

В ході дослідження розглянуто випадки, коли долото має півосі $a=0,1$ м, $b=0,3$ м та $a=0,3$ м, $b=0,1$. На рис.3 показані траєкторії руху точки контакту G по дну свердловини в нерухомій системі координат. Позиції а, б, в – відповідають випадкам витягнутого долота, г, д, е – сплюсненого долота. Відмітимо, що на рис. 3а коливання набувають безладного характеру, але їхні амплітуди зменшуються. Такий режим буріння можна розглядати як стабільний. На рис. 3б траєкторія руху після деякого розкручування переходить у коло постійного радіуса, проте на рис. 3 в,

д, е вона має вигляд кривих, що розширюються. Для випадку, представленого на рис. 3 г, крива руху долота має точки звороту. В них прискорення долота має найбільше значення, тому вони становлять найбільшу небезпеку для технічного процесу. При їхньому накладанні зі зсувом за декілька обертів крива траєкторії заповнює деяке кільце.

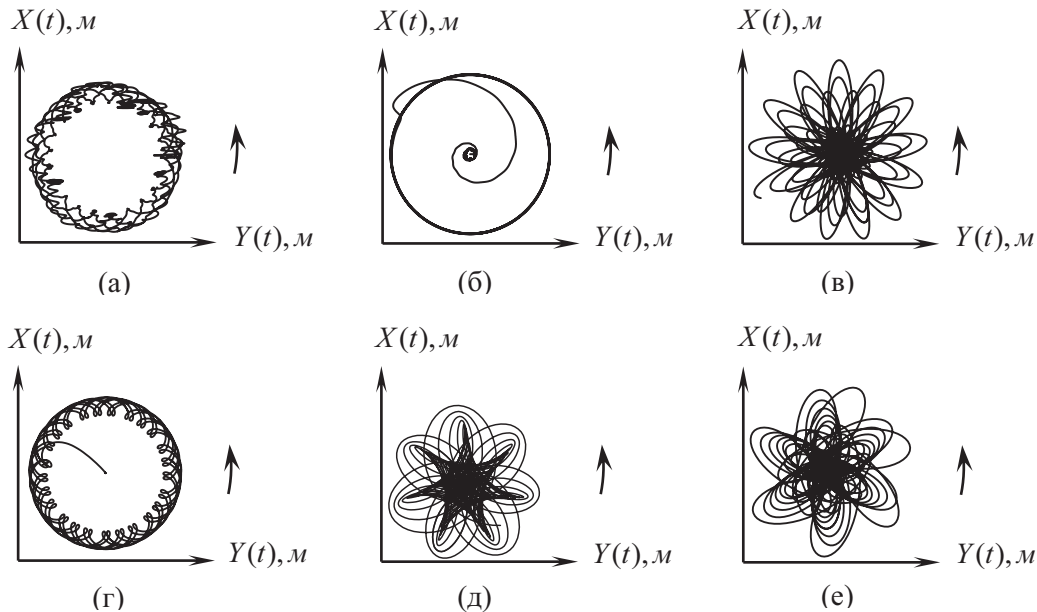


Рисунок 3 – Траєкторія руху точки контакту долота з дном свердловини в нерухомій системі координат

Висновки.

На основі розробленої моделі виконано аналіз механізму самозбурення коливань кружляння. Обговорюються кінематичні і динамічні ефекти, викликані змодельованою контактною взаємодією долота з дном свердловини. Встановлена аналогія між формами неголономних рухів долота і кельтських каменів. Показано, що в залежності від геометрії долота і кутової швидкості обертання, його кочення може бути як стійким, так і нестійким.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми 0112U000137 «Математичне моделювання процесів безаварійного буріння в сланцевих породах і в шельфових зонах морських акваторій»

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Schen A.E. Optimization of bit drilling performance using a new small vibration logging tool / A.E. Schen, A.D. Snell, B.H. Stanes // SPE / IADC Drilling Conference, 23–25 February 2005, Amsterdam, Netherlands. – P. 25–31.
2. Gulyayev V.I. Drill string bit whirl simulation with the use of frictional and nonholonomic models / V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk // Journal of Vibration and Acoustics. – 2015. – V.138, No.1. – P.011021-011021-9.
3. Gulyayev V.I. Whirl interaction of a drill bit with the bore-hole bottom / Nabil W. Musa, V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk, Aldabas Hasan // Modern Mechanical Engineering. – 2015. – V.5. – P.41-60.
4. Gulyayev V I. Nonholonomic dynamics of drill string bit whirling in a deep bore-hole / V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk. – Journal of Multi-body Dynamics. 2013 – V. 227, No.3. – P.234-244.
5. Gulyayev V.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells / V.I. Gulyayev, O.I. Borshch. – Journal of Petroleum Science and Engineering. 2011 — V. 78. – P. 759 – 764.
6. Warren T.M. Development of a whirl – resistant bit / T.M. Warren, J.F. Brett, L.A. Sinor. – SPE Drilling Engineering. 1990 – V. 5, No.4. – P. 267 – 275.
7. Stroud D. Real-time whirl detector improves rss reliability, drilling efficiency / D. Stroud, J. Pagett, D. Minett-Smith. – Hart Exploration & Production Magazine. 2011 – V. 84, No.8. – P.42 – 43.
8. Gulyayev V.I. Simulation of torsion relaxation auto-oscillations of drill string bit with viscous and Coulombic friction moment models / V.I. Gulyayev, S.N. Hudoliiy, O.V. Glushakova. – Journal of Multi-body Dynamics. 2011 – V. 225, No.1. – P. 139 – 152.

9. Jansen J.D. Whirl and chaotic motion of stabilized drill collars / J.D. Jansen. – SPE Drilling Engineering. 1992. – V. 7, No.2. – P.107 – 114.

REFERENCES

1. Schen A.E. Optimization of bit drilling performance using a new small vibration logging tool / A.E. Schen, A.D. Snell, B.H. Stanes // SPE / IADC Drilling Conference, 23–25 February 2005, Amsterdam, Netherlands. – P. 25–31.
2. Gulyayev V.I. Drill string bit whirl simulation with the use of frictional and nonholonomic models / V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk // Journal of Vibration and Acoustics. – 2015. – V.138, No.1. – P.011021-011021-9.
3. Gulyayev V.I. Whirl interaction of a drill bit with the bore-hole bottom / Nabil W. Musa, V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk, Aldabas Hasan // Modern Mechanical Engineering. – 2015. – V.5. – P.41-60.
4. Gulyayev V I. Nonholonomic dynamics of drill string bit whirling in a deep bore-hole / V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk. – Journal of Multi-body Dynamics. 2013 – V. 227, No.3. – P.234-244.
5. Gulyayev V.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells / V.I. Gulyayev, O.I. Borshch. – Journal of Petroleum Science and Engineering. 2011 — V. 78. – P. 759 – 764.
6. Warren T.M. Development of a whirl – resistant bit / T.M. Warren, J.F. Brett, L.A. Sinor. – SPE Drilling Engineering. 1990 – V. 5, No.4. – P. 267 – 275.
7. Stroud D. Real-time whirl detector improves rss reliability, drilling efficiency / D. Stroud, J. Pagett, D. Minett-Smith. – Hart Exploration & Production Magazine. 2011 – V. 84, No.8. – P.42 – 43.
8. Gulyayev V.I. Simulation of torsion relaxation auto-oscillations of drill string bit with viscous and Coulombic friction moment models / V.I. Gulyayev, S.N. Hudoliy, O.V. Glushakova. – Journal of Multi-body Dynamics. 2011 – V. 225, No.1. – P. 139 – 152.
9. Jansen J.D. Whirl and chaotic motion of stabilized drill collars / J.D. Jansen. – SPE Drilling Engineering. 1992. – V. 7, No.2. – P.107 – 114.

РЕФЕРАТ

Шевчук Л. В. Аналогія динаміки кочення еліпсоїдного долота й обертання кельтських каменів / Л.В. Шевчук // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2017. – Вип. 1 (37).

В статті на основі методів неголономної механіки поставлена задача про динаміку еліпсоїдальних доліт бурильних колон в глибоких свердловинах. Коливання кружляння відбувається за рахунок згинальних коливань бурильної колони і кочення долота по дну свердловини.

Об'єктом дослідження є долото бурильної колони в процесі його кочення по поверхні свердловини.

Мета роботи полягає в дослідженні крутильних коливань кружляння на основі неголономної взаємодії еліпсоїдного долота зі стінкою свердловини.

Методи дослідження – алгоритми чисельного інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь.

Проведено дослідження коливань кружляння бурильних колон при умові складної комбінації сил інерції їх обертального руху з урахуванням умов неголономного кочення долота по поверхні свердловини.

За допомогою розробленої системи виконаний комп'ютерний аналіз пружних коливань бурильної колони і долота при різних значеннях геометричних і механічних параметрів. Побудовані форми коливань кружляння долота в нерухомій системі координат. Показано, що коливання кружляння еліпсоїдних доліт сплюснutoї форми реалізуються за більш складними і непередбачуваними траєкторіями.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БУРИЛЬНА КОЛОНА, БУРІННЯ, ДОЛОТО, КОЛИВАННЯ КРУЖЛЯННЯ.

ABSTRACT

Shevchuk L. V. Analogy between ellipsoidal bit rolling and rotation of Celtic stones. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2017. – Issue 1 (37).

In the paper, the problem on dynamics of ellipsoidal drill bits in deep bore-holes is stated on the basis of nonholonomic mechanics methods. The whirling oscillations are realized through bending vibration of the drill string and bit rolling on the bore-hole bottom.

The investigation object is analysis of the whirling vibrations taking into account nonholonomic interaction of the ellipsoidal bit with the bore-hole wall.

The investigation methods include algorithms of numerical integration of nonlinear differential equations.

The analysis of drill string whirl vibration is performed taking into account complex combination of inertia forces of its rotary motion and conditions of the bit nonholonomic whirling of the bore-hole bottom surface.

With the help of the elaborated system, the computer analysis of the drill string elastic vibrations and the bit whirling is fulfilled for different values of their geometric and mechanic parameters. The modes of the bit whirling in the fixed coordinate system are constructed. It is shown the whirling vibrations of the oblate ellipsoidal bits proceed with forming more complicated and unpredictable trajectories.

KEYWORDS: DRILL STRING, DRILLING, BIT, WHIRLING VIBRATION.

РЕФЕРАТ

Шевчук Л. В. Аналогия динамики качения эллипсоидного долота и вращения кельтских камней / Л.В. Шевчук // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2017. – Вып. 1 (37).

В статье на основе методов неголономной механики поставлена задача о динамике эллипсоидальных долот бурильных колонн в глубоких скважинах. Колебания кружения происходит за счет изгибных колебаний бурильной колонны и качения долота по дну скважины.

Объектом исследования является долото бурильной колонны в процессе его качения по поверхности скважины.

Цель работы заключается в исследовании крутильных колебаний кружения с учетом неголономного взаимодействия эллипсоидного долота со стенкой скважины.

Методы исследования – алгоритмы численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений.

Проведено исследование колебаний кружения бурильных колонн при условии сложной комбинации сил инерции их вращательного движения с учетом условий неголономного качения долота по поверхности скважины.

С помощью разработанной системы выполнен компьютерный анализ упругих колебаний бурильной колонны и долота при различных значениях геометрических и механических параметров. Построены формы колебаний кружения долота в неподвижной системе координат. Показано, что колебания кружения эллипсоидных долот сплюснутой формы реализуются более сложными и непредсказуемыми траекториями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: БУРИЛЬНАЯ КОЛОННА, БУРЕНИЕ, ДОЛОТО, КОЛЕБАНИЯ КРУЖЕНИЯ.

АВТОР:

Шевчук Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, тел. +380667153633, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе 42, к. 511.

AUTHOR:

Shevchuk Lyudmila Volodymyrivna, Ph.D., National Transport University, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, tel. +380667153633, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str. 42, of. 511.

АВТОР:

Шевчук Людмила Владимировна, кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, тел. +380667153633, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе 42, к. 511.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гайдайчук В.В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

Лоза І.А., доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Gaidaichuk V.V., Ph.D., Engineering (Dr.), professor, Kyiv National University of Structures and Architecture, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.

Loza I.A., Ph.D., Physics and Mathematics (Dr), professor, National Transport University, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.