УДК 539.3
UDC 539.3

# ТОРСІОННІ КОЛИВАННЯ ГЛИБОКИХ БУРИЛЬНИХ КОЛОН У В'ЯЗКОМУ РІДКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Глазунов С.М., Національний транспортний університет, Київ, Україна

# TORSION AUTOVIBRATIONS OF DEEP DRILL STRINGS IN VISCOUS LIQUID MEDIUM

Glazunov S.N., National Transport University, Kyiv, Ukraine

# ТОРСИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГЛУБОКИХ БУРИЛЬНЫХ КОЛОНН В ВЯЗКОЙ ЖИДКОЙ СРЕДЕ

Глазунов С.Н., Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Постановка проблеми. В останні роки намітилась світова тенденція до збільшення потреби в енергетичних ресурсах, що призводить до помітного попиту на вуглеводневі палива. Тому особливої актуальності набувають питання інтенсифікації їх видобутку з великих глибин і забезпечення високого рівня їх підняття.

В даній роботі досліджуються пружні крутильні автоколивання глибокої бурильної колони, які викликані нелінійною залежністю прикладеного до долота крутного моменту сил тертя (різання). Аналізуються моделі автоколивань бурильних колон, побудовані в формі пружних торсіонних маятників в рідкому середовищі. Досліджуються ефекти критичних переходів (біфуркацій Хопфа) від станів стаціонарного обертання системи до пружних автоколивань і назад. Показано, що форми цих автоколивань суттєво відрізняються від гармонічних (томсонівських) і мають релаксаційний характер, що полягає в чергуванні швидких і повільних рухів.

Аналіз досліджень і публікацій. Крутильні автоколивання доліт бурильних колон (БК) є проявом одного з найбільш загальних ефектів механіки, що пов'язаний з генеруванням автоколивань при реалізації біфуркації Хопфа. Ці коливання і стійкість БК більш детально розглянуті в роботах [2,10-16,18]. Проте оскільки у хвильовій моделі не враховувались фрикційні ефекти, обумовлені оточенням БК в'язкою рідиною, було вказано на необхідність розробки дисипативної моделі. Вона була запропонована в [3] з використанням основних положень теорії в'язкої рідини [1, 4 – 9]. Нижче обговорюються ще одна дисипативна модель.

Метою статті є розробка математичної моделі торсіонних автоколивань бурильної колони в дисипативному середовищі.

В загальному випадку, при побудові такої моделі необхідно виходити з рівняння динаміки крутіння стержня, зануреного в рідину

$$GI\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}-k\left(\omega+\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right)-\rho I\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}=0 \qquad \left(0\le z\le L\right) \tag{1}$$

Тут $\varphi$ − кут пружного закручування елемента труби БК; $G$ − модуль пружності матеріалу труби при зсуві; $\omega$ − кутова швидкість обертання труби; $k$ − коефіцієнт, що враховує в'язке тертя в рідині; $I$ − полярний момент інерції площі перерізу труби; $z$ − осьова координата; $L$ − довжина БК; $t$ − час.

Для рівняння (1) записуються граничні умови

$$\varphi(0)=0, \qquad M^{ин}(L)+M^{упр}(L)+M^{тр}(L)=0, \tag{2}$$

де $M^{ин}(L)$ − момент сил інерції, які діють на долото; $M^{упр}(L)$ − пружний крутний момент, що передається на долото з боку БК; $M^{тр}(L)$ − момент сил тертя, який задається діаграмою різання для даної пари долота і породи.

Ці моменти обчислюються за формулами

$$M^{ин}(L) = -J\ddot{\varphi}(L), \qquad M^{упр}(L) = GI \cdot \partial\varphi / \partial z\big|_{z=L}, \tag{3}$$

де $J$ − момент інерції долота відносно $Oz$.

Вид функції $M^{тр}(\omega + \dot{\varphi})$ залежить від міцності породи, що оброблюється, а також від конструкції і ступеня зношеності різців долота. В граничних випадках для деяких видів матеріалів, що піддаються обробці, в зоні екстремуму функція тертя стає ламаною, а спадна (зростаюча) ділянка перетворюється у вертикальний відрізок. Тим не менш вважається, що навіть якщо для кожного різця долота функція різання має вигляд, ламаної кривої, сумарна функція моменту сил тертя $M^{тр}(\omega + \dot{\varphi})$ для всього долота в результатах усереднення по всім різцям, що містяться на його поверхні, набуває більш гладкої форми, показаної на рис. 1.

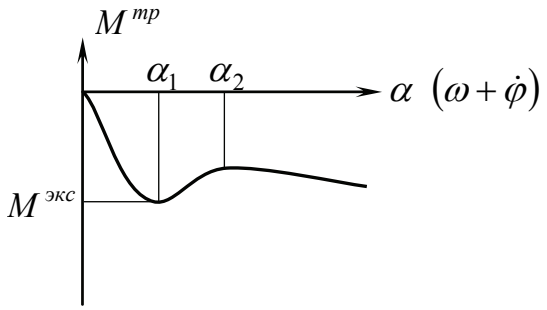


Рисунок 1 − Діаграма моменту сил тертя.

Розглянемо динаміку торсіонних рухів всієї бурильної колони і долота під дією моменту сил пружності $M^{пр}$; розподілених моментів $m^{тер}$ сил в'язкого тертя, що діють на елементи БК; моменту сил різання породи $M_b{}^{тер}$; розподілених моментів $m^{ін}$ сил інерції, діючих на елементи БК; моменту $M_b{}^{ін}$ сил інерції, що діють на долото [1].

Тоді рівняння коливань системи можна представити у вигляді

$$M_{ds}{}^{ін} + M_b{}^{ін} + M_{ds}{}^{тер} + M_b{}^{тер} + M_{ds}{}^{пр} = 0. \tag{4}$$

Тут момент всіх сил інерції, прикладених до бурильної колони, дорівнює

$$M_{ds}{}^{ін} = \int_0^L m^{ін} dz = -\int_0^L \rho I \ddot{\varphi}(z) dz = -\int_0^L \rho I \frac{\ddot{\varphi}_b}{L} z dz = -\frac{\rho I \ddot{\varphi}_b L^2}{2L} = -\frac{1}{2}\rho I L \ddot{\varphi}_b, \tag{5}$$

момент сил інерції долота складає

$$M_b{}^{ін} = -J\ddot{\varphi}_b, \tag{6}$$

момент всіх сил тертя, прикладених до бурильної колони, підраховується так

$$M_{ds}{}^{тер} = \int_0^L m^{тер} ds = -\int_0^L \mu\left(\omega + \frac{\dot{\varphi}_b}{L} z\right) dz = -\mu\omega L - \frac{1}{2}\mu L \dot{\varphi}_b, \tag{7}$$

момент сил тертя, прикладених до долота, визначається рівністю

$$M_b{}^{тер} = M_b{}^{тер}(\omega + \dot{\varphi}_b), \tag{8}$$

момент сил пружності, прикладений до бурильної колони, обчислюється за формулою

$$M_{ds}{}^{пр} = -GI \frac{\partial\varphi}{\partial z} = -GI \frac{\varphi_b}{L}. \tag{9}$$

Враховуючи (5) – (9), отримаємо з рівняння (4)

$$-\left(J + \frac{1}{2}\rho I L\right)\ddot{\varphi}_b + M_b{}^{тер}(\omega + \dot{\varphi}_b) - \mu\omega L - \frac{1}{2}\mu L \dot{\varphi}_b - \frac{GI}{L}\varphi_b = 0. \tag{10}$$

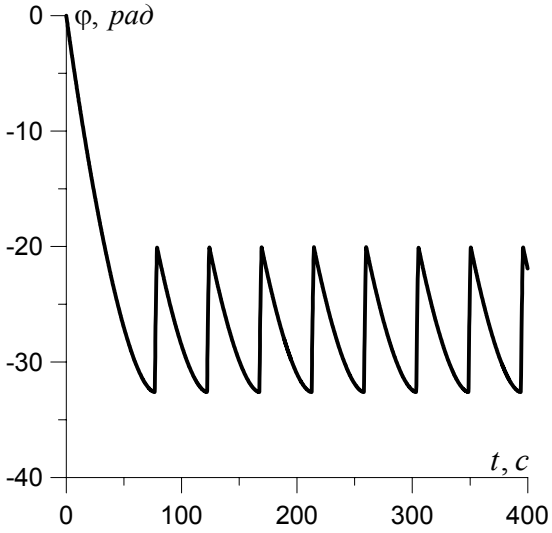


Рисунок 2 − Графік крутильних автоколивань долота в стані втрати граничного циклу ( $L = 1000$ *м* , $k = 5 \cdot 10^{-3}$ $H \cdot c$ , $\omega_в = 3{,}47$ *рад* / *с* ).

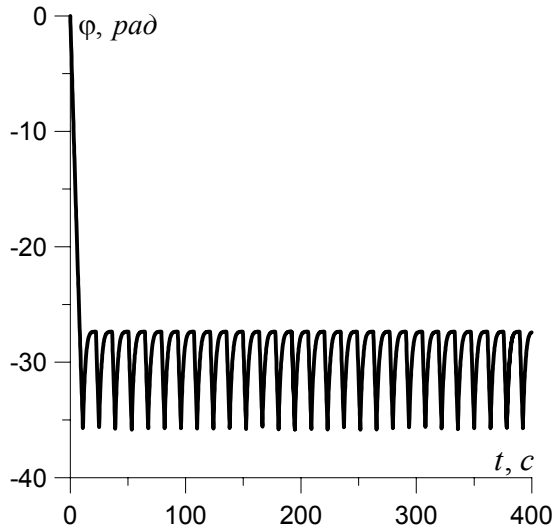


Рисунок 3 − Графік крутильних автоколивань долота в стані втрати граничного циклу ( $L = 1000$ *м* , $k = 10$ $H \cdot c$ , $\omega_в = 3{,}47$ *рад* / *с* ).

Для встановлення особливостей явища самозбудження торсіонних коливань БК без урахування сил її в'язкого тертя з оточуючим її потоком промивної рідини виконано чисельне моделювання обертань стальної колони з параметрами $L = 1000$ *м* , $I = 3{,}12 \cdot 10^{-5}$ *м*$^4$ , $J = 3{,}1$ *кг* $\cdot$ *м*$^2$ , $\rho = 7{,}8 \cdot 10^3$ *кг* / *м*$^3$ в діапазоні зміни кутової швидкості $0 \le \omega \le 4$ *рад* / *с* . Прийнята форма залежності $M^{тр}(\omega + \dot{\varphi})$ показана на рис. 1 при $M^{экс} = -82500$ $H \cdot м$ , $\alpha_1 = 0{,}72$ *рад* / *с* , $\alpha_2 = 3{,}8$ *рад* / *с* .

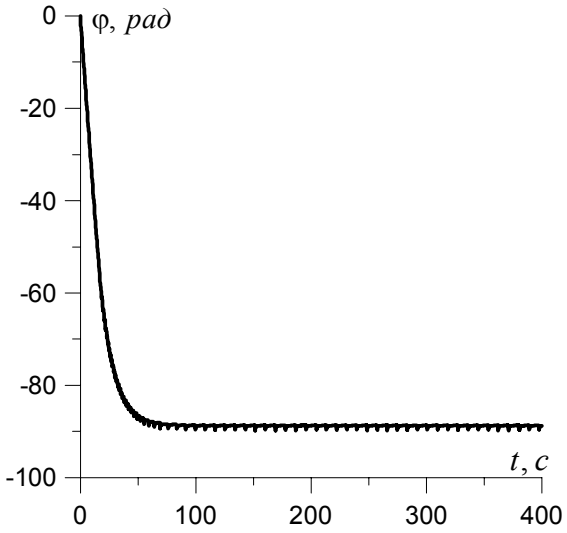


Рисунок 4 - Графік крутильних автоколивань долота в стані втрати граничного циклу ( $L = 1000$ *м* , $k = 100$ $H \cdot c$ , $\omega_в = 3{,}47$ *рад* / *с* ).

Дослідження автоколивань БК за допомогою даної моделі показало, що вагомий вплив на автоколивальний процес здійснює момент сил тертя, прикладений до долота, а дією сил в'язкого тертя промивної рідини на трубу БК для реальних значень $k = 5 \cdot 10^{-3}$ $H \cdot c$ можна знехтувати. В зв'язку з цим була поставлена задача про визначення тенденції впливу значення $k$ на автоколивальний процес и визначення величини $k$ , при яких цей вплив стає помітним. Результати досліджень представлені на рис. 2-4.

На рис. 2 представлена діаграма залежності кута пружного закручування БК від часу при $k = 5 \cdot 10^{-3}$ $H \cdot c$ , $\omega_в = 3{,}47$ *рад* / *с* . На рис. 3,4 − графік зміни кута $\varphi$ при $k = 10$ $H \cdot c$ і $k = 100$ $H \cdot c$ відповідно. Такі великі коефіцієнти сил в'язкого тертя в природі не зустрічаються, але можемо бачити, що навіть в цих випадках крутильні коливання залишаються релаксаційними, проте змінюється їх характер.

В результаті досліджень виявлено найбільш деструктивний ефект, що супроводжує коливання. Він пов'язаний з режимом руху долота "застій-ковзання". При "застої", коли швидкість обертання долота практично рівна нулю, бурильна колона продовжує обертатись в своїй верхній частині, і в ній накопичується енергія пружних деформацій, достатня для продовження різання породи. Потім

відбувається швидке локальне руйнування породи в зоні її контакту з різцями, долото "зривається" і починає "ковзати" з кутовою швидкістю, яка в декілька разів перевищує швидкість її обертання в штатному режимі. Ці різкі удари можуть викликати руйнування різців долота або, принаймні, прискорити їх затуплення в абразивному середовищі породи. В більш тяжких випадках вони можуть також супроводжуватись руйнуванням інших елементів БК або зниженням загальної ефективності буріння. Як показує практика, негативні ефекти, що відбуваються в бурильній конструкції, ще більше посилюються із псуванням доліт.

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

**1.** Глазунов С.М. Консервативні і дисипативні моделі торсіонних автоколивань колон глибокого буріння / С.М. Глазунов // Вісник НТУ. − 2013. − № 28, частина 2. − С. 88 – 94.

**2.** Гуляев В.И. Квантованные аттракторы в волновых моделях торсионных колебаний колонн глубокого бурения / В.И. Гуляев, О.В. Глушакова, С.Н. Худолий. // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела.-2010. - №2. С. 134-147.

**3.** Гуляєв В.І. Математична модель крутильних автоколивань бурильної колони в рідких середовищах / В.І. Гуляєв, О.В. Глушакова, С.М. Глазунов // Вісник НТУ. − 2012. − № 26, частина 2. − С. 413 – 419.

**4.** Дмитриченко Н.Ф. Эластогидродинамика: теория и практика./ Н.Ф. Дмитриченко – Львів, Львівська політехніка, 2000. – 224 с.

**5.** Костецкий Б.И. Механико-химические процессы при граничном трении. / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бершадскний – М.: Наука, 1972. – 173 с.

**6.** Лодж А. Эластичные жидкости / А. Лодж // М.: Наука, 1969. – 463с.

**7.** Мирзаджанадзе А.Х. Гидравлика глинистых и цементных растворов. / А.Х. Мирзаджанадзе, А.А. Мирзоян, Г.М. Гевинян, М.К. Сейдрза – М.: Недра, 1966. – 386с.

**8.** Рабинович М.К. Введение в теорию колебаний и волн / М.К. Рабинович, Д.И. Трубецков– М.: Наука, 1984.-432с.

**9.** Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. / У.Л. Уилкинсон – М.: Мир, 1964. – 318с.

**10.** Ford Brett J. The genesis of torsional drillstring vibrations // SPE Drilling Engineering. – 1992, v.7, September. – P. 168-174.

**11.** 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.

**12.** Gulyayev V.I. The buckling of elongated rotating drill strings / V.I. Gulyayev, V.V. Gaidaichuk, I.L. Solovjov, I.V. Gorbunovich // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2009. – 67. – P.140-148.

**13.** Gulyayev V.I. The computer simulation of drill column dragging in inclined bore-holes with geometrical imperfections / V.I. Gulyayev, S.N. Hudoly, L.V. Glovach // International Journal of Solids and Structures. – 2011. – V.48. – P.110–118.

**14.** Gulyayev V.I. Sensitivity of resistance forces to localized geometrical imperfections in movement of drill strings in inclined bore-holes / V.I. Gulyayev, S.V. Khudoliy, E.N. Andrusenko // Interaction and Multiscale Mechanics. – 2011. – V.4. – No.1. – P.1-16.

**15.** Gulyayev V. Large-scale and small-scale self-excited torsional vibrations of homogeneous and sectional drill strings / V.Gulyayev, O. Glushakova.// Interaction and Multiscale Mechanics. ― 2011. – V. 4, №4. – P. 139 – 152.

**16.** 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, - P. 139 – 152.

REFERENCES

**1.** Glazunov S.M. Conservative and dissipative models of torsion autovibrations of deep drill strings. Visnyk NTU. 2013. V. 28, №2. P. 88 – 94. (Ukr)

**2.** Gulyayev V.I., Glushakova O.V., Hudoliy S.N. Quantized attractors in wave models of torsion vibrations of deep drill strings. Известия Российской академии наук. Mechanics of Solids. 2010. V.2, No.2. P. 134 – 147. (Rus).

**3.** Gulyayev V.I., Glushakova O.V., Glazunov S.N. Mathematic model of torsional autovibrations of drill strings in liquid media. Visnyk NTU. 2012. V. 26, №2. P. 413 – 419. (Ukr)

**4.** Dmitrichenko N.F. Elasto-hydro-dynamics: theory and practice. Lviv, Lvivska politehnica. 2000. 224 p. (Rus)

**5.** Kosteckiy B.I., Natanson M.E., Bershadsliy L.I. Mechanic-chemical processes in limit friction.Moskva: Nauka. 1972. 173 p. (Rus)

**6.** Lodj A. Elastic liquids. Moskva: Nauka. 1969. 463 p.(Rus)

**7.** Mirzajanadze A.H., Mirzoyan A.A., Gevinyan G.M., Seydrza M.K. Hydraulics of claycy and cement solutions. Moskva: Nedra. 1966. 386p. (Rus)

**8.** Rabinovich M.K., Trubeckov D.I. Introduction of non-linear vibrational systems with energy source. Moskva: Nauka. 1984. 432 p. (Rus)

**9.** Uilkinson U.L. Non-newtonian liquids. Moskva: Mir. 1964. 318p. (Rus)

**10.** Ford Brett J. The genesis of torsional drillstring vibrations. SPE Drilling Engineering.1992. v.7, September. P. 168-174.

**11.** Gulyayev V.I., Borshch O.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2011. V.78. P. 759-764.

**12.** Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Solovjov I.L., Gorbunovich I.V. The buckling of elongated rotating drill strings. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2009. V. 67. P.140-148.

**13.** Gulyayev V.I., Hudoly S.N., Glovach L.V. The computer simulation of drill column dragging in inclined bore-holes with geometrical imperfections. International Journal of Solids and Structures. 2011. V.48. P.110–118.

**14.** Gulyayev V.I., Khudoliy S.V., Andrusenko E.N. Sensitivity of resistance forces to localized geometrical imperfections in movement of drill strings in inclined bore-holes. Interaction and Multiscale Mechanics. 2011. V.4, No.1. P. 1-16.

**15.** Gulyayev V., Glushakova O., Large-scale and small-scale self-excited torsional vibrations of homogeneous and sectional drill strings. Interaction and Multiscale Mechanics. 2011. V. 4, №4. P. 139 – 152.

**16.** Gulyayev V.I., Hudoliy S.N., Glushakova O.V. Simulation of torsion relaxation auto-oscillations of drill string bit with viscous and Coulombic friction moment. Journal of Multi-body Dynamics. 2010. V.225. P. 139 – 152.

**17.** Gulyayev V.I., Shevchuk L.V. Nonholonomic dynamics of drill string bit whirling in a deep bore-hole. Journal of Multi-body Dynamics. 2013. V.227, №3. P. 234 – 244

## РЕФЕРАТ

Глазунов С.М. Торсіонні коливання глибоких бурильних колон у в'язкому рідкому середовищі. / С.М. Глазунов // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2015. – Вип. 1 (31).

Поставлено задачу про самозбудження крутильних коливань бурильної колони, що обертається в рідкому середовищі глибокої свердловини.

Обговорюється модель механічної взаємодії бурильної колони з в'язкою рідиною, що оточує її, побудовані розв'язувальні рівняння з частинними і звичайними похідними. Розроблена методика їх розв'язання. В результаті проведеного комп'ютерного моделювання встановлено, що автоколивання є релаксаційними і функції, що їх описують, мають ділянки швидких та повільних рухів.

Результати моделювання можуть бути використані при розробці технології буріння глибоких нафтових і газових свердловин.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БУРИЛЬНА КОЛОНА, ТОРСІОННІ АВТОКОЛИВАННЯ, СИЛИ В'ЯЗКОГО ТЕРТЯ, МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, БІФУРКАЦІЯ ХОПФА, ШВИДКІ І ПОВІЛЬНІ РУХИ.

## ABSTRACT

Glazunov S.M. Torsion autovibrations of deep drill strings in viscous liquid medium. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2015. – Issue 1 (31).

The problem about self-excitation of torsion vibration of a drill string in a vertical cylindrical cavity of a bore-hole with liquid medium is stated.

The model of the drill string interaction with ambient viscous liquid is discussed. The constitutive nonlinear differential equations with partial and ordinary derivatives are formulated. The algorithm for numeric integration of this equation by spatial and time variables is proposed. It is shown that the autovibrations are of relaxation type and have the segments of fast and slow motions.

The results of the article can be inculcated into the practice of deep bore-hole drilling.

KEYWORDS: DRILL STRING, TORSION AUTOVIBRATIONS, VISCOUS FRICTION FORCES, MATHEMATIC MODELS, HOPF'S BIFURCATION, FAST AND SLOW MOTIONS.

РЕФЕРАТ

Глазунов С.Н. Торсионные колебания глубоких бурильных колонн в вязкой жидкой среде. / С.Н. Глазунов // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2015. – Вып. 1 (31).

Поставлена задача о самовозбуждении крутильных колебаний вращающейся бурильной колонны в жидкой среде глубокой скважины.

Обсуждается модель механического взаимодействия бурильной колонны с окружающей ее вязкой жидкостью, построены разрешающие уравнения в частных и обычных производных. Разработана методика их решения. В результате проведенного компьютерного моделирования установлено, что автоколебания являются релаксационными и описывающие их функции имеют участки быстрых и медленных движений.

Результаты моделирования могут быть использованы при разработке технологии бурения глубоких нефтяных и газовых скважин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: БУРИЛЬНАЯ КОЛОННА, ТОРСИОННЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ.

АВТОР:

Глазунов Сергій Миколайович, аспірант, Національний транспортний університет, e-mail: s.glazunov@smart-energy.com.ua, тел. +380503033569, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе 42, к. 511.

AUTHOR:

Glazunov Sergey Nikolayevich, post-graduate student, National Transport University, e-mail: s.glazunov@smart-energy.com.ua, tel. +380503033569, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str. 42, of. 511.

АВТОР:

Глазунов Сергей Николаевич, аспирант, Национальный транспортный университет, e-mail: s.glazunov@smart-energy.com.ua, тел. +380503033569, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе 42, к. 511.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Рассказов О.О., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

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

REVIEWERS:

Rasskazov O.O., Dr. Sc., Professor, National Transport University, head of the Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.

Gaidachuk V.V., Dr. Sc., Professor, Kyiv National University of Structures and Architecture, head of the Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.