

БІФУРКАЦІЙНІ СТАНИ НАДДОВГИХ ОБЕРТОВИХ СТРИЖНІВ З ЦЕНТРУВАЧАМИ

Горбунович І.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, irina.gorbunovich@gmail.com, orcid.org/0000-0002-6859-0663

Соловійов І.Л., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, i.soloviov@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0001-5203-4139

BIFURCATION STATES OF SUPER LONG ROTATING RODS WITH CENTRALIZERS

Gorbunovich I.V., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, irina.gorbunovich@gmail.com, orcid.org/0000-0002-6859-0663

Solov'ev I.L., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, i.soloviov@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0001-5203-4139

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими й практичними завданнями.

У гірництві, в цілому, і в нафтогазовій галузі, зокрема, широкого застосування набув роторний спосіб буріння вертикальних надглибоких свердловин. Під час буріння роторним способом бурильна колона піддається дії розтягувальних, стискальних, крутних, згинальних навантажень. Наявні також додаткові інерційні навантаження. Для стабілізації бурильної колони в її конструкцію вводять допоміжні елементи. До них відносять, зокрема, центрувачі. Центрувач є опорно-центрувальним елементом, який створює проміжну опору бурильної колони для зменшення прогинання компоновки низу бурильної колони.

Інтенсифікація видобутку підземних енергетичних ресурсів з великих глибин і забезпечення високого рівня їх добування за допомогою сучасних бурильних геотехнологій найближчим часом будуть постійно зростати. Але великі глибини й складні геологічні умови значно затруднюють буріння надглибоких свердловин. Режими буріння можуть супроводжуватися ефектами біфуркаційного випинання колон, інтенсифікацією їхніх вібрацій та іншими позаштатними ситуаціями. Під час дослідження цих процесів бурильна колона ототожнюється, як правило, з обертовим наддовгим стрижнем. Тому, враховуючи викладене вище, можна стверджувати, що проблема дослідження біфуркаційних станів наддовгих обертових стрижнів з центрувачами є досить актуальною.

Аналіз публікацій, в яких розпочато дослідження даної проблеми і на які спираються автори.

Об'єктом дослідження в роботах [1-4] є бурильні колони у вертикальних надглибоких свердловинах. Досліджуються біфуркаційні рівноважні стани обертових надглибоких колон, критичні сполучення їхніх характерних параметрів і форми початкового випинання.

Побудовано сингулярно збурені диференціальні рівняння квазістатичної й динамічної поведінки бурильної колони в пружній постановці. Двоточкові крайові задачі для цих рівнянь зведено до крайових задач для нормальних систем лінійних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами.

Показано, що важливим фактором, який впливає на квазістатичну й динамічну поведінку бурильної колони, є її обертання. А внутрішні потоки промивної рідини породжують в бурильних колонах дуже складні ефекти.

У статті [5] розглядаються біфуркаційні випинання обертових гіпердовгих стрижнів з урахуванням внутрішнього потоку рідини. Виконано теоретичні дослідження біфуркаційних станів стрижнів за різних значень характерних геометричних параметрів і параметрів навантаження.

Постановка завдання. Виклад основного матеріалу дослідження.

Розглядається пружний наддовгий обертовий вертикальний трубчастий стрижень з внутрішнім потоком рідини (рис.1). У верхній точці $z = 0$ (точці підвісу) стрижень шарнірно закріплено. В нижній найменш стабільній зоні стрижень має центрувачі, що відіграють роль проміжних шарнірних опор. На нижній кінець $z = L$ стрижня діє вертикальна стискавальна сила R . Під час обертання стрижня з кутовою швидкістю ω на нього діють поздовжня сила T , крутний момент M_z , відцентрові сили

інерції $(\rho F + \rho_p F_p)\omega^2 u$ й сили $V^2 \rho_p F_p d^2 u / dz^2$ інерції від руху зі швидкістю V внутрішнього потоку рідини.

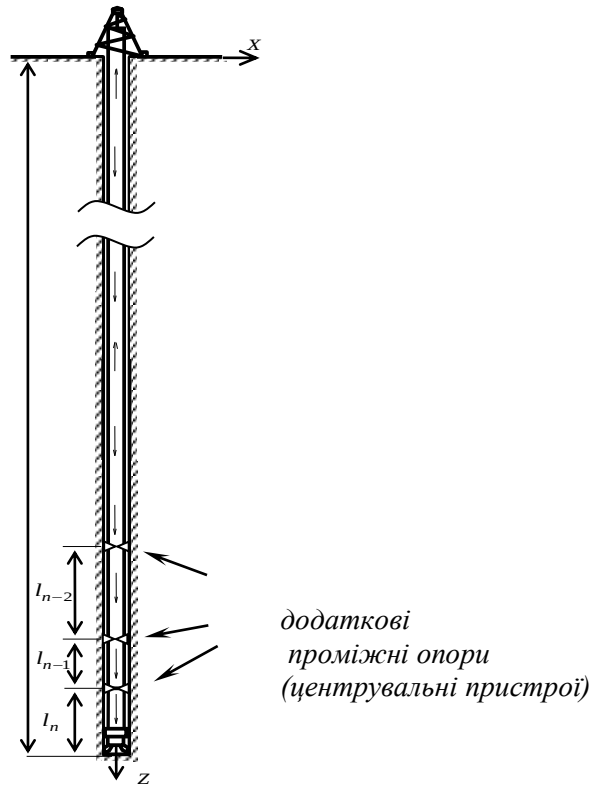


Рисунок 1 – Геометрична схема стрижня з центрувачами
Figure 1 – Geometric scheme of a rod with centralizers

Досліджується багатоточкова крайова задача про стійкість прямолінійної форми стрижня з урахуванням стабілізуючого чинника додаткових центрувачів в обертовій системі координат $Oxuz$:

$$\begin{aligned} EI \frac{d^4 u}{dz^4} - \frac{d}{dz} \left(T \frac{du}{dz} \right) - M_z \frac{d^3 v}{dz^3} - (\rho F + \rho_p F_p) \omega^2 u + V^2 \rho_p F_p \frac{d^2 u}{dz^2} &= 0, \\ EI \frac{d^4 v}{dz^4} - \frac{d}{dz} \left(T \frac{dv}{dz} \right) + M_z \frac{d^3 u}{dz^3} - (\rho F + \rho_p F_p) \omega^2 v + V^2 \rho_p F_p \frac{d^2 v}{dz^2} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де u, v – пружні переміщення елемента труби уздовж осей Ox, Oy відповідно; z – поздовжня координата; EI – згинна жорсткість стрижня; ρ, ρ_p – щільності матеріалу труби стрижня і рідини; F, F_p – площі поперечного перерізу труби і її внутрішнього круга; V – швидкість руху внутрішнього потоку рідини.

Під час інтегрування цих рівнянь на кінцях $z=0, z=L$ використовуються крайові умови шарнірного спирання

$$\begin{aligned} u(0) = v(0) = 0, \quad u(L) = v(L) = 0, \\ \frac{d^2 u}{dz^2} \Big|_{z=0} = \frac{d^2 v}{dz^2} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{d^2 u}{dz^2} \Big|_{z=L} = \frac{d^2 v}{dz^2} \Big|_{z=L} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

До них додаються умови зрощування розв'язків на додаткових опорах (умови взаємодії стрижня з centruвачами). Нехай, наприклад, i -тий опорний пристрій встановлено в перерізі $z = z_i$. Тоді в цій точці стрижень умовно поділяють на лівий і правий сегменти, і розв'язки зрощують за допомогою умов

$$\begin{aligned} u(z_i^-) &= u(z_i^+) = 0, & v(z_i^-) &= v(z_i^+) = 0, \\ \frac{du}{dz} \Big|_{z=z_i^-} &= \frac{du}{dz} \Big|_{z=z_i^+}, & \frac{dv}{dz} \Big|_{z=z_i^-} &= \frac{dv}{dz} \Big|_{z=z_i^+}, \\ \frac{d^2u}{dz^2} \Big|_{z=z_i^-} &= \frac{d^2u}{dz^2} \Big|_{z=z_i^+}, & \frac{d^2v}{dz^2} \Big|_{z=z_i^-} &= \frac{d^2v}{dz^2} \Big|_{z=z_i^+}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $z_i^- = z_i -$, $z_i^+ = z_i +$.

Сукупність значень параметрів T , M_z , ω , V , L , за яких однорідна система (1) – (3) має нетривіальні розв'язки, є біфуркаційною. Вона визначає критичні квазістатичні стани прямолинійної форми стрижня.

Система (1) двох рівнянь четвертого порядку зводиться до системи восьми рівнянь першого порядку:

$$\frac{d\vec{y}}{dz} = Q_1\vec{y} + T(z)Q_2\vec{y} + \frac{dT(z)}{dz}Q_3\vec{y} + M_zQ_4\vec{y} + \omega^2Q_5\vec{y} + V^2Q_6\vec{y}. \quad (4)$$

Вектор-функція $\vec{y}(z)$ повинна задовольняти граничним умовам (2), (3), які можна представити у вигляді

$$A_1\vec{y}(0) = 0, \quad A_2\vec{y}(z_2) = 0, \quad \dots, \quad A_{n-1}\vec{y}(z_{n-1}) = 0, \quad A_n\vec{y}(L) = 0, \quad (5)$$

де A_1 , A_n – сталі матриці розміру 4×8 ; $A_2, \dots, A_{n-1}$ – матриці розміру 8×8 ; n – число всіх опор стрижня

Загальний розв'язок системи (4), (5) за заданих $T(z)$, M_z , ω , V подається у формі Коші:

$$\vec{y}(z) = Y(z)\vec{C}. \quad (6)$$

Далі будується однорідна система лінійних алгебричних рівнянь:

$$D\vec{C} = 0. \quad (7)$$

Реалізація описаного алгоритму пов'язана з деякими додатковими особливостями, що викликані наявністю в конструкції стрижня centruвальних елементів на його нижньому кінці. В результаті чого фундаментальні розв'язки $Y(z)$ рівняння (6) стають розривними, а процедура їх ортогоналізації важко здійснюється. Тому для розв'язування системи (4), (5) пропонується метод декомпозиції: опорними перерізами стрижень поділяють на окремі частини, будують частинні розв'язки для кожної з них і зрощують їх.

Нехай в нижній частині стрижень має п'ять centruвальних пристроїв B, C, D, E, F і стає шестипролітним (рис.2). На кожній із введених опор виконуються умови рівності нулю переміщень u, v та неперервності кутів повороту і згинних моментів. Ці умови використовуються для зрощення частинних розв'язків. Проілюструємо застосування цієї методики на прикладі опори D між прольотами 3 і 4. Умовно виділимо балочні підконструкції в цих прольотах та прийнемо, що вони жорстко закріплені на кінцях C, D і E (рис. 2).

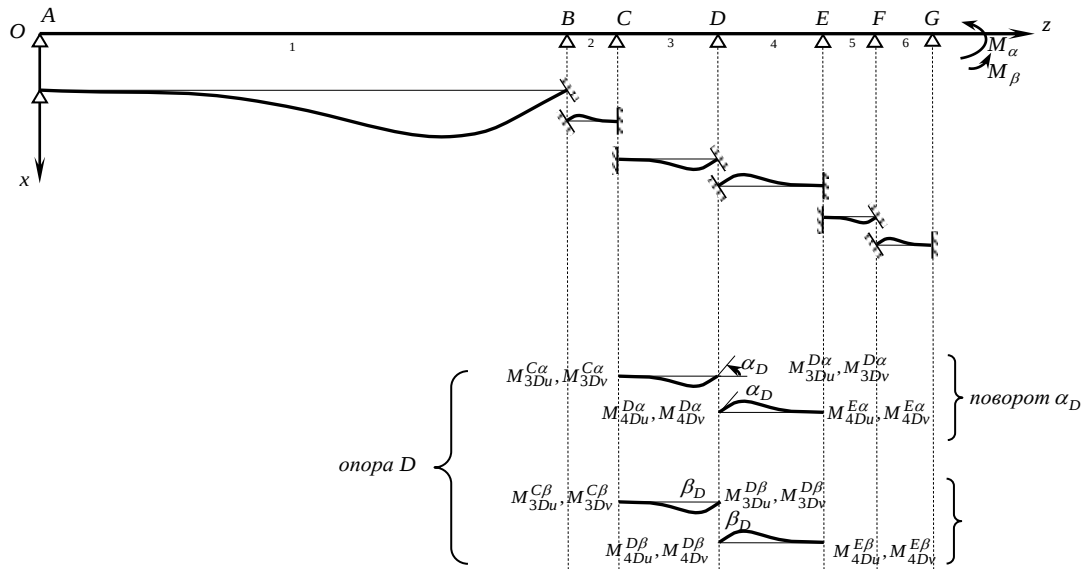


Рисунок 2 – Схема зрощення згинних моментів на проміжній опорі D
 Figure 2 –The scheme of splice of bending moments over interim support D

Під час деформування системи в площині xOz опора D повертається на кут α_D . Для його визначення повернемо опору D на одиничний кут та знайдемо викликані ним момент $M_{3Dx}^{D\alpha}$ на опорі D третього прольоту і момент $M_{4Dx}^{D\alpha}$ на опорі D четвертого прольоту. Під час повороту опор C та E на одиничні кути в площині xOz на опорі D виникнуть відповідні моменти $M_{3Cx}^{D\alpha}$ та $M_{4Ex}^{D\alpha}$. Аналогічно знаходимо моменти $M_{3Cx}^{D\beta}$, $M_{3Dx}^{D\beta}$, $M_{4Dx}^{D\beta}$, $M_{4Ex}^{D\beta}$ від повороту опор C, D, E на одиничні кути β в площині yOz .

Такі повороти кінців виділених балок на одиничні кути α і β викличуть також відповідні згинні моменти на опорі D в площині yOz . Оскільки згинні моменти неперервні в конструкції, суми всіх цих моментів зліва і справа на опорі D в кожній з площин xOz , yOz рівні. Виходячи з цього, отримуємо два рівняння зрощення згинних моментів на цій опорі

$$\begin{aligned}
 & -M_{3Cx}^{D\alpha} \alpha_C - M_{3Cx}^{D\beta} \beta_C + \left(-M_{3Dx}^{D\alpha} + M_{4Dx}^{D\alpha} \right) \alpha_D + \left(-M_{3Dx}^{D\beta} + M_{4Dx}^{D\beta} \right) \beta_D + \\
 & \quad + M_{4Ex}^{D\alpha} \alpha_E + M_{4Ex}^{D\beta} \beta_E = 0, \\
 & -M_{3Cy}^{D\alpha} \alpha_C - M_{3Cy}^{D\beta} \beta_C + \left(-M_{3Dy}^{D\alpha} + M_{4Dy}^{D\alpha} \right) \alpha_D + \left(-M_{3Dy}^{D\beta} + M_{4Dy}^{D\beta} \right) \beta_D + \\
 & \quad + M_{4Ey}^{D\alpha} \alpha_E + M_{4Ey}^{D\beta} \beta_E = 0.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Аналогічно будуються рівняння зрощення розв'язків на проміжних опорах B, C, E, F .

Метод декомпозиції дозволяє знайти незалежні частинні розв'язки задач про згин окремих, не пов'язаних між собою шести балок під дією одиничних кутів повороту їхніх кінців і далі за допомогою системи десяти лінійних алгебричних рівнянь виду (8) знайти по п'ять значень α_i , β_i кутів повороту стрижня на відповідних проміжних опорах. Випадок, коли ця система алгебричних рівнянь виявляється виродженою, пов'язаний з виродженням матриці D системи (7) і відповідає біфуркаційному стану стрижня з центрувачами, а власний вектор цієї матриці визначає форму втрати стійкості такого стрижня.

Висновки з даного дослідження.

У статті вивчається актуальна задача про біфуркаційні стани пружних наддовгих вертикальних трубчастих стрижнів з внутрішнім потоком рідини. Досліджується вплив центрувальних елементів, геометричних і силових параметрів на стабілізацію нижньої зони стрижня.

Запропоновані багатоточкові крайові задачі розв'язуються методом декомпозиції, який дозволяє знайти незалежні частинні розв'язки задач про згин не пов'язаних між собою балок. А це, в свою чергу, дає можливість визначити біфуркаційні квазістатичні стани прямолінійної форми стрижня з центрувачами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гуляев В.И. Квазистатические критические состояния колонн глубокого бурения / В.И. Гуляев, В.В. Гайдайчук, И.Л. Соловьев, И.В. Горбунович // Проблемы прочности. – 2006. – № 5. – С. 109-119.
2. Gulyayev V.I. Analysis of rotating drill column length influence on stability of its quasistatic equilibrium / V.I. Gulyayev, P.Z. Lugovoy, V.V. Gaydaychuk, I.L. Solovjov, I.V. Gorbunovich // Int. Appl. Mech. – 2007. – 43. - № 9 (12). – P. 83-92.
3. Gulyayev V.I. The buckling of elongated rotating drill strings / V.I. Gulyayev, V.V. Gaidaichuk, I.L. Solovjov, I.V. Gorbunovich // J. Petr. Sci. Eng. – 2009. No 67. – P. 140 – 148.
4. Горбунович И.В. Изучение проблемы выявления критических режимов функционирования бурильных колонн в вертикальных и криволинейных скважинах / И.В. Горбунович, Л.В. Левковская // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – №1(40). – 2018. – С.90 –97.
5. Горбунович І.В. Біфуркаційні випинання обертових гіпердовгих стрижнів з внутрішнім потоком рідини / І.В. Горбунович // Вісник Національного транспортного університету. – 2010. – №21. – С.310 –314.

REFERENCES

1. Gulyayev V.I. Gaydaychuk V.V., Solov'ev I.L., Gorbunovich I.V. (2006). Kvavzistaticheskie kriticheskie sostoyaniya kolonn glubokogo bureniya [Quasistatic and critical states of deep drilling columns]. Problemy prochnosti –Journal Strength of Materials, 5, 109-119 [in Russian].
2. Gulyayev V.I. Analysis of rotating drill column length influence on stability of its quasistatic equilibrium / V.I. Gulyayev, P.Z. Lugovoy, V.V. Gaydaychuk, I.L. Solov'ev, I.V. Gorbunovich // Int. Appl. Mech. – 2007. – 43. - № 9 (12). – P. 83-92.
3. Gulyayev V.I. The buckling of elongated rotating drill strings / V.I. Gulyayev, V.V. Gaidaichuk, I.L. Solov'ev, I.V. Gorbunovich // J. Petr. Sci. Eng. – 2009. No 67. – P. 140 – 148.
4. Gorbunovich I.V., Levkovskaia L.V. [2018]. Izuchenie problemy vyiyavleniya kriticheskikh rezhimov funktsionirovaniya burilnykh kolonn v vertikalnykh i krivolineynykh skvazhinah [Investigation of the problem of detection of critical parameters of operation of drill columns in vertical and curvilinear wells]. Visnyk Natsionalnoho Transportnoho Universytetu. Seriiia «Tekhnichni nauky». Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk – Visnyk of National Transport University. «Technical sciences» series. Scientific and Technical collection, 1(40), 90–97 [in Russian].
5. Gorbunovich I.V. (2010). Bifurkatsiini vypynannia obertovykh hiperdovhykh stryzhniv z vnutrishnim potokom ridyny [Bifurcation projections of rotating super long strings with internal fluid flow]. Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – Visnyk National Transport University, 21, 310 – 314 [in Ukrainian].

РЕФЕРАТ

Горбунович І.В. Біфуркаційні стани наддовгих обертових стрижнів з центрувачами / І.В. Горбунович, І.Л. Соловйов // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К.: НТУ, 2022. – Вип. 1 (51).

У статті розглянуто наддовгий пружний трубчастий прямолінійний вертикальний стрижень з внутрішнім потоком рідини з центрувачами у його нижній частині.

Зазначено причини, що сприяють виникненню біфуркаційного випинання стрижня. Поміж цих причин, як основні, виділяються і описуються внутрішня поздовжня сила, крутний момент, сили інерції обертання стрижня, сили інерції внутрішнього потоку рідини.

Мета дослідження – виявити зародження біфуркаційних станів стрижнів з центрувальними елементами.

Методи дослідження полягають у побудові сингулярно збурених багатоточкових крайових задач, які визначають напружено-деформований стан і стійкість стрижня. Розв'язуючи їх методом декомпозиції, можна виявити зародження біфуркаційних станів наддовгих обертових стрижнів з центрувачами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАДДОВГИЙ СТРИЖЕНЬ, ОБЕРТОВИЙ РУХ, ВНУТРІШНІЙ ПОТІК РІДИНИ, ЦЕНТРУВАЧІ, ПОЗДОВЖНЯ СИЛА, КРУТНИЙ МОМЕНТ, БАГАТОТОЧКОВА КРАЙОВА ЗАДАЧА, БІФУРКАЦІЙНІ СТАНИ, МЕТОД ДЕКОМПОЗИЦІЇ.

ABSTRACT

Gorbunovich I.V., Solov'ev I.L. Bifurcation states of super long rotating rods with centralizers. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue. 1 (51).

The article deals with a super long elastic tubular vertical rod with centralizers embedded in its lower part and an internal fluid flow.

The reasons of appearance of bifurcation protrusion of the rod are stated. Among these reasons, an internal longitudinal force, torque, inertia forces rotating rods, inertia forces of internal fluid flow are identified and described as main ones.

The purpose of the study is to detect the beginning of bifurcation states of rods with centralizers.

Research methods are based on the construction of singularity perturbed multi-point boundary-value problems determining the stress-strain state and stability of the rod. Applying decomposing approach, the beginning of bifurcation states of rods with centralizers are detected.

KEY WORDS: SUPER LONG ROD, ROTATIONAL MOTION, INTERNAL FLUID FLOW, CENTRALIZERS, LONGITUDINAL FORCE, TORQUE, MULTI-POINT BOUNDARY PROBLEM, BIFURCATION STATES, METHOD OF DECOMPOSITION.

АВТОРИ:

Горбунович Ірина Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: irina.gorbunovich@gmail.com, тел. +380676001177, Україна, 01103, м. Київ, вул Бойчука, буд. 42, к.514, orcid.org/0000-0002-6859-0663.

Соловйов Ігор Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: i.soloviov@ntu.edu.ua, тел. +380991693545, Україна, 01103, м. Київ, вул Бойчука, буд. 42, к.514, orcid.org/0000-0001-5203-4139.

AUTHORS:

Gorbunovich Iryna Valentynivna, Ph.D., National Transport University, associate professor department of high mathematics, e-mail: irina.gorbunovich@gmail.com, tel. +380676001177, Ukraine, 01103, Kyiv, Boychuka str.,42, of. 514, orcid.org/0000-0002-6859-0663.

Solov'ev Igor Leonidovych, Ph.D., National Transport University, associate professor department of high mathematics, e-mail: i.soloviov@ntu.edu.ua, тел. +380991693545, Ukraine, 01103, Kyiv, Boychuka str.,42, of. 514, orcid.org/0000-0001-5203-4139.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Луговий П.З., доктор технічних наук, професор, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, завідувач відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій, Київ, Україна.

Мейш Ю.А., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри вищої математики, Київ, Україна.

REVIEWER:

Lugovoy P.Z., Engineering (Dr.), Professor, S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Structure mechanics of thin-walled structures department head professor, Kyiv, Ukraine.

Meish Y.A., Engineering (Dr.), Professor, National Transport University, Higher mathematics department professor, Kyiv, Ukraine.