

УДК 539.3

СТІЙКІСТЬ СТЕРЖНІВ, ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ, ПРИ ЗБУДЖЕННІ ЗГІНАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ВИЩОГО ПОРЯДКУ ПІД ЧАС ДІЇ ВІБРОУДАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

П.П. Лізунов,
д-р техн. наук, професор

В.О. Недін,
канд. техн. наук

*Київський національний університет будівництва і архітектури
просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ. 03037*

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.150-156

В роботі наведені результати дослідження динамічної поведінки моделі робочого органу вібробурильної установки під дією поздовжнього віброударного навантаження з метою виявлення діапазонів частот збудження коливань вищого порядку та аналізу впливу такого збудження на стійкість. Побудовані діаграми, що відображають діапазони ударних частот, при яких відбувається збільшення числа напівхвиль пружної лінії стержня при різних параметрах системи.

Ключові слова: геометрична нелінійність, інерційні навантаження, поздовжні ударні навантаження, вібробуріння, форми вигину.

Вступ. При здійсненні коливального руху стержнів, що обертаються, під час дії зовнішніх періодичних ударних навантажень можливий різний характер поперечних коливань в залежності від фізичних, геометричних та динамічних параметрів. Коливання можуть відбуватись зі збільшенням числа напівхвиль пружної лінії стержня (рис. 1). Задачі динаміки таких систем виникають при проектуванні конструкцій робочих органів вібробурильних машин. Коливальний рух стержнів, якими моделюється робота бурильної колони, описується складними системами диференціальних рівнянь з частковими похідними з урахуванням інерційних навантажень, які обумовлюються переносними, відносними та коріолісовими прискореннями. Експлуатація зазначеного обладнання здійснюється зі зміною довжини (глибини занурення робочого органу), що впливає на зміну значень критичних швидкостей, які в свою чергу залежать також від форми коливань. Через це цікавим є питання вивчення динамічної поведінки досліджуваної системи з метою виявлення частот віброударного впливу, при яких відбуваються згинальні коливання зі зростанням числа напівхвиль, а також амплітуди коливань.

За останній час задачі динаміки коливань стержнів, що обертаються, досліджені в роботах

багатьох авторів. Приділено багато уваги стержням значної довжини при дії поздовжніх стискаючих навантажень, періодичних навантажень, ударних та віброударних навантажень.

В монографії [1] приведені результати чисельних досліджень динамічної поведінки віброударної системи, яка є сильно нелінійною негладкою розривною динамічною системою. Надані результати спостережень багатьох цікавих явищ, зокрема таких, які є унікальними для негладких систем. Знайдені зони стійкого та нестійкого рухів із застосуванням методу продовження розв'язку за параметром та аналізу

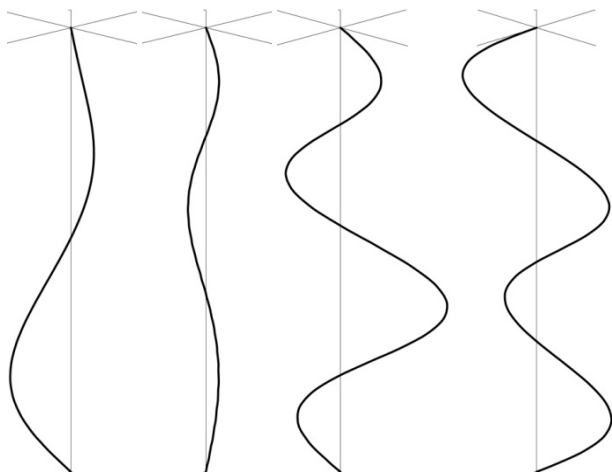


Рис. 1. Форми коливань стержнів при обертанні

мультиплікаторів Флоке. Описані розривні біфуркації, ефект гістерезису, сценарії квазіперіодичного переходу до хаосу, перехідний хаос, гранична криза, перехідні режими. Виконаний порівняльний аналіз методів моделювання удару у віброударних системах з твердим (жорстким) та м'яким ударом.

Багато наукових праць присвячено вивченню динаміки роботи бурильних колон. В роботі [2] розглянуто задачу динамічної поведінки бурильних установок та взаємодію коливань башти, приводної системи та бурильної колони. Виконано аналіз механізму самозбудження коливань. Побудовано форми згинальних рухів конструкції бурильної колони при різних значеннях характерних параметрів. В роботі [3] розглянуто задачу пружного нелінійного згинального деформування бурильних колон у циліндричних порожнинах вертикальних надглибоких нафтових і газових свердловин. На основі теорії гнучких криволінійних стержнів із використанням спеціально обраної системи відліку побудовані нелінійні звичайні диференціальні рівняння, що описують контактну взаємодію труби бурильної колони зі стінкою свердловини. Запропоновано методику чисельного розв'язку розв'язувальних рівнянь. Розглянуті результати комп'ютерного моделювання. В роботі [4] на основі теорії гнучких криволінійних стержнів сформульовано задачу про пружну деформацію бурильних колон у каналах надглибоких нахилених свердловин. Вважається, що свердловина має геометричні недосконалості своєї осової лінії у вигляді локалізованих спіралей. Чисельно проаналізовано залежність сил опору руху бурильних колон від амплітуд, кроків та місць локалізації геометричних недосконалостей. Проаналізовано числові результати.

Також низка результатів досліджень, що пов'язані із вивченням динаміки бурильного устаткування в процесі експлуатації, представлена в роботах закордонних авторів. Так, в роботі [8] досліджується вплив періодичних ударних навантажень на конструктивні елементи бурильного устаткування при поздовжніх коливаннях. В роботі [9] досліджується динаміка бурильної колони під впливом великих та малих осових ударних навантажень. У випадку великого ударного навантаження бурильна колона розглядається як суцільний стержень під ударним навантаженням падаючої маси і застосовується метод збереження енергії. Розроблено механічну модель, в якій бурильна колона розглядається як система під дією гармонічної сили. Проведено аналіз чутливості впливу розміщення генератора удару та частоти удару на динаміку бурильної колони. В роботі [11] в нелінійній постановці розглядається задача динаміки бура бурової установки з урахуванням поздовжньої періодичної сили ударної дії. Дослідження виконані з метою вивчення вібрацій, що виникають в з'єднувальній муфті.

З огляду існуючих результатів дослідження цікавим залишається питання динаміки змодельованої системи зі спостереженням за розвитком процесу коливань у реальному часі. Результати такого дослідження коливального руху стержня, що моделює роботу бурильної колони при обертанні, після виведення його зі стану рівноваги наведені в роботі [7]. У вигляді поточних форм вигину у фіксований момент часу показано, що дія зосередженої на нижньому кінці вагомому стержня сили, яка стискує, призводить до збільшення амплітуди вигину пружної лінії стержня в нижній частині, в наслідок чого починає відбуватись його закручування.

При дослідженні динаміки довгих стержнів, поперечні коливання яких можуть здійснюватись зі зміною числа напівхвиль, ключовим є питання, що пов'язане з впливом періодичних сил. В роботі [5] представлено результати чисельного дослідження впливу дії періодичної поздовжньої сили на поперечні коливання довгих стержнів, що обертаються. Коливальний рух розглянуто в просторі з урахуванням дії гіроскопічних сил та геометричної нелінійності стержня. Для досліджуваних об'єктів показано, що на різних швидкостях обертання і частотах дії ударного поздовжнього навантаження коливальний рух відбувається з неоднаковою поведінкою. На певних швидкостях з різною частотою дії осового навантаження коливання мають встановлену періодичність і виникають із биттями, які є результатом дії періодичної осової сили. В роботі [6] наведені результати дослідження впливу віброударних навантажень на стійкість стержня робочого органа вібробурового агрегату при бурінні свердловин в твердих породах ґрунту Побудовані діаграми, що відображають області стійкого та нестійкого руху стержня, яким моделюється робочий орган вібробурової установки, при різних параметрах системи. Показано, що при певних значеннях швидкостей обертань і частот

Результати. В даній роботі, використовуючи зазначену програму, здійснено дослідження динаміки бурильного пристрою під дією поздовжнього віброударного навантаження. Розглянуто роботу бурового снаряда в діапазонах швидкості обертання ω до 5 с^{-1} з частотою дії

ударного навантаження $\theta = 100 \dots 150 \text{ с}^{-1}$. Стержень робочого органу трубчастий зовнішнім діаметром $d = 0.146 \text{ м}$, товщиною стінки $s = 0.008 \text{ м}$.

Перед тим, як оцінити вплив зміни форм власних коливань на процес коливального руху досліджуваних об'єктів, варто проаналізувати залежності частот власних коливань та критичних швидкостей обертання від довжини стержня та кількості напівхвиль його пружної лінії.

На рис. 3 показані залежності частот власних коливань λ від довжини l – для стержнів, що не обертаються, а на рис. 4 – залежності критичних частот обертання ω від довжини l , в діапазоні довжин від 20 до 40 м, для кількості напівхвиль n від 1 до 10.

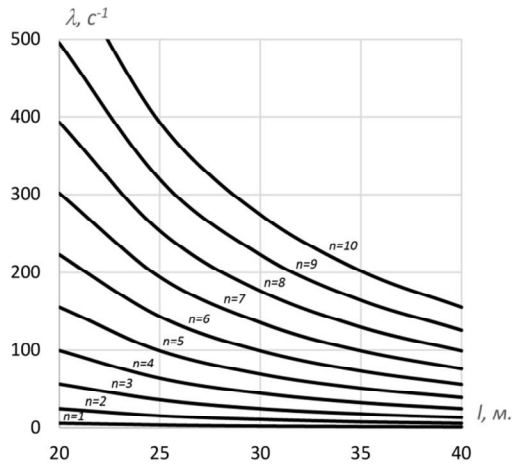


Рис. 3. Залежність частот власних коливань стержня λ від його довжини

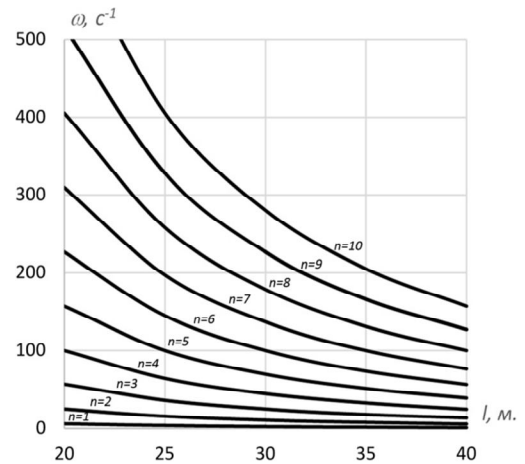


Рис. 4. Залежність критичних частот обертання стержня ω від його довжини

При обертанні стержня частота його власних коливань λ збільшується пропорційно збільшенню швидкості обертання ω , а при критичній швидкості дорівнює їй, тобто $\lambda = \omega$. Як показують графіки, зі збільшенням довжини стержня значення частот власних коливань так само, як і критичних швидкостей обертання суттєво зменшуються, при цьому різниця між λ (для стержня, що не обертається) і значенням його критичної швидкості ω наближається до 0. При збільшенні кількості напівхвиль стержня певної довжини значення частоти його власних коливань та критичних частот обертання відповідно збільшуються. Це в свою чергу впливає на стійкість стержня, оскільки при обертанні із закритичною швидкістю амплітуда його коливань постійно зростає.

На рис. 5 наведені діапазони ударних частот θ , при яких відбувається формування згинальних форм коливань стержня зі збільшенням числа напівхвиль в залежності від довжини l при значенні $\omega = 0$. Графік показує, що для стержнів меншої довжини діапазон частот ударного впливу θ , при яких відбувається зміна форм коливань зі збільшенням числа напівхвиль, значно менший, ніж для стержнів більшої довжини. Область таких діапазонів на діаграмі відокремлена двома граничними лініями і позначена сірим кольором. За межами діапазону частот для певної довжини стержня зміна кількості напівхвиль при коливальному русі не відбувається. При збільшенні довжини стержня діапазон ударних частот, при яких відбувається збудження коливань вищого порядку, суттєво розширюється.

На рис. 6-8 на фоні областей стійкого та нестійкого коливального руху в залежності від співвідношення швидкості обертання ω та частоти ударів θ відображені діапазони ударних частот θ , при яких відбувається збільшення числа напівхвиль, в залежності від швидкості обертання ω для стержнів довжиною 20 м (рис. 6), 25 м (рис. 7), 30 м (рис. 8). На діаграмах світло-сірим кольором відображені області нестійкого руху, білим – стійкого, області діапазонів ударних частот збудження хвиль на діаграмах відображені темно-сірим кольором.

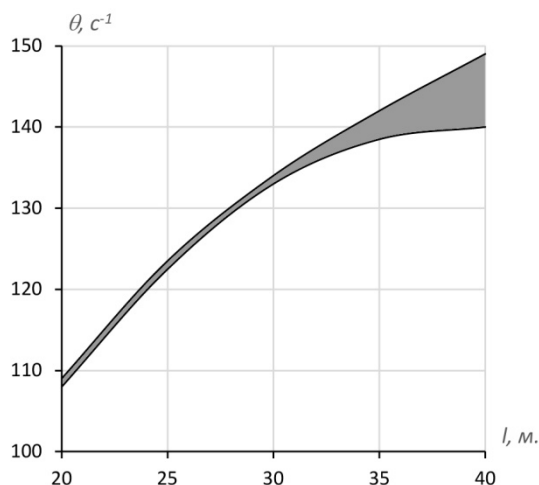


Рис. 5. Діапазони ударних частот збудження хвиль θ в залежності від довжини стержня l

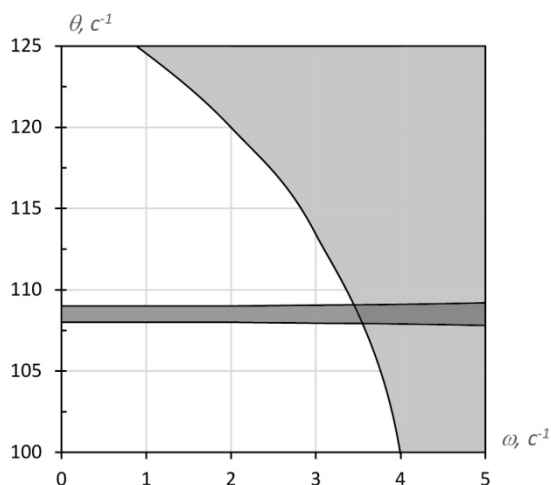


Рис. 6. Области динамічної стійкості та діапазони ударних частот збудження хвиль θ в залежності від швидкості обертання ω для стержнів довжиною $l=20$ м

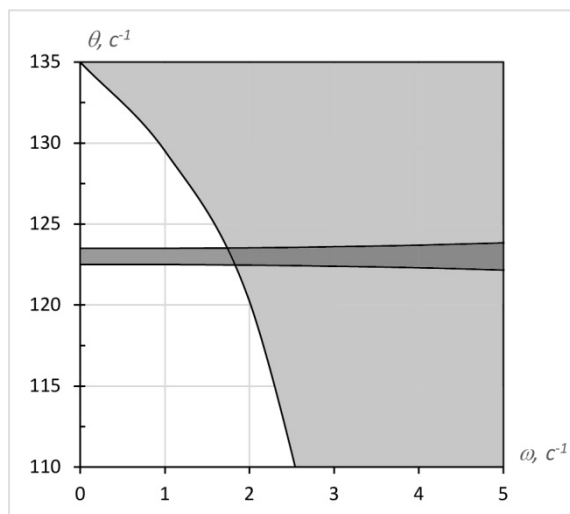


Рис. 7. Области динамічної стійкості та діапазони ударних частот збудження хвиль θ в залежності від швидкості обертання ω для стержнів довжиною $l=25$ м

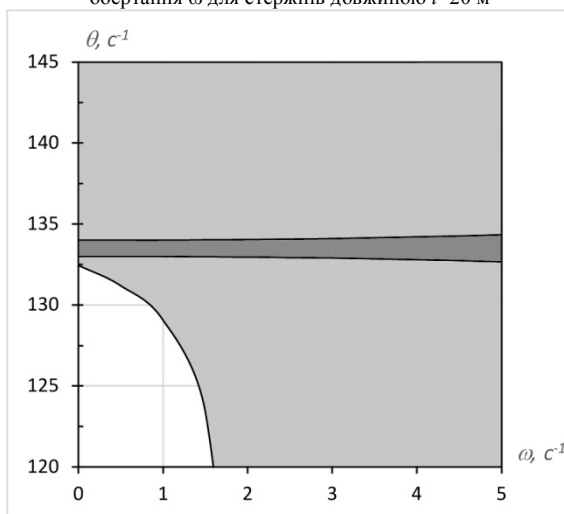


Рис. 8. Области динамічної стійкості та діапазони ударних частот збудження хвиль θ в залежності від швидкості обертання ω для стержнів довжиною $l=30$ м

Результати показують, що зі збільшенням швидкості обертання стержня ω діапазон частот θ повільно розширюється. За межами діапазону зміна числа напівхвиль при коливальному русі не відбувається. При збільшенні частоти обертання стержнів в області збудження відбувається не лише зростання кількості напівхвиль, але й збільшення амплітуди коливань, що викликає значні прогини стержня, внаслідок чого напруження в перерізах зростають до критичних значень, що неминуче призводить до руйнування, особливо це відбувається в областях нестійкого коливального руху, що відображено на діаграмах.

Висновок. Отримані результати досліджень впливу поздовжніх віброударних навантажень на динамічну поведінку моделі робочого органу вібробурильної установки показали, що для стержнів різної довжини, якими моделюється робота зазначеного обладнання, існують діапазони частот дії поздовжнього ударного навантаження, при яких відбувається зміна форм поперечних коливань зі зростанням числа напівхвиль. При збільшенні довжини стержнів, а також при збільшенні швидкості їх обертання цей діапазон розширюється і в ньому, окрім зростання кількості напівхвиль, може відбуватися збільшення амплітуди коливань, інтенсивне зростання якої спостерігається в областях нестійкого коливального руху.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А.* Хаос та сценарії переходу до хаосу у віброударній системі / В.А. Баженов, О.С. Погорелова, Т.Г. Постнікова – Київ: Вид-во «Каравела», 2019. – 146 с.
2. *Гуляев В. И., Гайдайчук В.В., Худолый С.Н.* Компьютерное моделирование динамики конструкций установок глубокого бурения // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2009. - Вип. 4. – С. 208-216.
3. *Гуляев В.И., Худолый С.Н., Андрущенко Е.Н.* Нелинейное деформирование бурильных колонн в сверхглубоких цилиндрических скважинах // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2012. - Вип. 9. – С. 5-17.
4. *Гуляев В.И., Луговой П.З., Андрущенко Е.Н.* Численное моделирование упругого изгиба бурильной колонны в сверхглубокой криволинейной скважине // Прикладная механика – 2014, 50, № 4. – С. 67-76.
5. *Лізунов П.П., Нєдін В.О.* Параметричні коливання пружних стержнів, що обертаються, під дією періодичних поздовжніх сил // Управління розвитком складних систем. – 2020. – № 44. – С. 56-64.
6. *Лізунов П.П., Нєдін В.О.* Стійкість стержнів, що обертаються, під дією віброударного навантаження // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2021. – Вип. 106. С. 113-121.
7. *Нєдін В.О.* Чисельне диференціювання складних форм вигину стержнів значної довжини при обертанні // Управління розвитком складних систем. – 2020. – № 43. – С. 110-115.
8. *Changgen Bu.* Arithmetic solution for the axial vibration of drill string coupling with a down-the-hole hammer in rock drilling / Changgen Bu, Xiaofeng Li, Long Sun and Boru Xia // Journal of Vibration and Control. – 2016, Vol. 22(13). – P. 3090-3101.
9. *Liping Tang.* Effects of axial impact load on the dynamics of an oilwell drillstring / Liping Tang, Xiaohua Zhu, Hongzhi Lin // Advances in Mechanical Engineering. – 2019, Vol.11 (3), 1-8. doi: 10.1177/1687814019836876.
10. *Maurice Petyt.* Introduction to Finite Element Vibration Analysis. Cambridge University Press, 1990. – 558 p.
11. *Songyong Liu.* Coupling vibration analysis of auger drilling system / Songyong Liu, Xinxia Cui, Xiaohui Liu // Journal of vibroengineering. – 2013. Vol. 15. – P.1442-1453.

REFERENCES

1. *Bazhenov V.A., Pohorelova O.S., Postnikova T.G.* Khaos ta stsenariyi perekhodu do khaosu u vibroudarniy systemi (Chaos and transition scenarios to chaos in a vibration-shock system). – Kyiv: Vyd-vo «Karavela», 2019. – 146 p.p.
2. *Gulyayev V.I., Gaydaychuk V.V., Khudolii S.N.* Kompyuternoe modelirovanie dinamiki konstrukttsii ustanovok glubokogo bureniya (Computer modeling of dynamics of deep drilling rigs' constructions). - Scientific Works Journal of the Ukrainian Research Institute of Steel Structures named after V.M. Szymanowski. – 2009, 4, 208-216.
3. *Gulyayev V.I., Khudolii S.N., Andrusenko E.N.* Nelineinoe deformirovanie burilnikh kolonn v sverkhglubokikh tsilindricheskikh skvazhinakh (Nonlinear deformation of drill strings in ultra-deep cylindrical wells). - Scientific Works Journal of the Ukrainian Research Institute of Steel Structures named after V.M. Szymanowski. – 2012. 9. 5-17.
4. *Gulyayev V.I., Lugovoi P.Z., Andrusenko E.N.* Chislennoe modelirovanie uprugogo izgiba burilnoi kolonni v sverkhglubokoi krivolineinoi skvazhine (Numerical modeling of elastic bending of a drill string in an ultra-deep curved borehole). - Applied Mechanics. – 2014, 50 (4). 67-76.
5. *Lizunov P., Nedin V.* Parametrychni kolyvannia pruznykh sterzhniv, shcho obertaiutsia, pid diieiu periodychnykh pozdovzhnykh syl (The parametric oscillations of rotating elastic rods under the action of the periodic axial forces) // Management of Development of Complex Systems. – 2020, 44, 56-64.
6. *Lizunov P.P., Nedin V.O.* Stiikist sterzhniv, shcho obertaiutsia, pid diieiu vibroudarnoho navantazhennia (The stability of rotating rods under the action of vibro-impact load). - Strength of materials and theory of structures. – 2021. – Issue 106, 113-121.
7. *Nedin V.* Numerical differentiation of complex bend forms of long rotating rods // Management of Development of Complex Systems. – 2020, 43, 110-115.
8. *Changgen Bu.* Arithmetic solution for the axial vibration of drill string coupling with a down-the-hole hammer in rock drilling / Changgen Bu, Xiaofeng Li, Long Sun and Boru Xia // Journal of Vibration and Control. – 2016, Vol. 22(13). – P. 3090-3101.
9. *Liping Tang.* Effects of axial impact load on the dynamics of an oilwell drillstring / Liping Tang, Xiaohua Zhu, Hongzhi Lin // Advances in Mechanical Engineering. – 2019, Vol.11 (3), 1-8. doi: 10.1177/1687814019836876.
10. *Maurice Petyt.* Introduction to Finite Element Vibration Analysis. Cambridge University Press, 1990. – 558 p.
11. *Songyong Liu.* Coupling vibration analysis of auger drilling system / Songyong Liu, Xinxia Cui, Xiaohui Liu // Journal of vibroengineering. – 2013. Vol. 15. – P.1442-1453.

Стаття надійшла 09.10.2025

Лізунов П.П., Нєдін В.О.

СТІЙКІСТЬ СТЕРЖНІВ, ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ, ПРИ ЗБУДЖЕННІ ЗГІНАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ВИЩОГО ПОРЯДКУ ПІД ЧАС ДІЇ ВІБРОУДАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В роботі наведені результати дослідження динамічної поведінки моделі робочого органу вібробурильної установки під дією поздовжнього віброударного навантаження з метою виявлення діапазонів частот збудження коливань вищого порядку та аналізу впливу такого збудження на стійкість. Руйнування матеріалу при вібраційно-обертальному бурінні відбувається через спільну дію віброударних імпульсів і обертального руху, що суттєво полегшує процес буріння свердловин в твердих породах ґрунту. Коливання робочого органу в такому разі може здійснюватись зі зміною форм коливань, для яких буде змінюватись число напівхвиль та їх довжина. Через це цікавим стає питання вивчення

динамічної поведінки досліджуваної системи з метою виявлення частот віброударного впливу, при яких відбувається згинальні коливань зі зростанням числа напівхвиль. Для пошуку таких діапазонів частот дії поздовжнього ударного навантаження на стержень, що здійснює коливальный рух при обертанні, дослідження здійснено з використанням розробленого програмного забезпечення, в якому реалізована методика комп'ютерного моделювання коливального руху стержнів значної довжини, що обертаються, під дією поздовжніх періодичних навантажень. За допомогою зазначеного програмного забезпечення на фоні областей стійкого та нестійкого коливального руху в залежності від співвідношення швидкості обертання та частоти ударного впливу побудовані діаграми, що відображають діапазони ударних частот, при яких відбувається збільшення числа напівхвиль пружної лінії стержня, яким моделюється робочий орган вібробурильної установки, при різних параметрах системи. Відзначено, що зі збільшенням швидкості обертання стержнів певної довжини розширюється діапазон ударних частот при яких зростає число на півхвиль, а також може відбуватися збільшення амплітуди коливань, інтенсивне зростання якої відбувається в областях нестійкого коливального руху. Здійснено аналіз отриманих результатів та зроблено висновок про можливість експлуатації обладнання у певних діапазонах частот.

Ключові слова: геометрична нелінійність, інерційні навантаження, поздовжні ударні навантаження, вібробуріння, форми вигину.

Lizunov P.P., Nedin V.O.

THE STABILITY OF ROTATING RODS DURING THE EXCITATION OF HIGHER-ORDER BENDING OSCILLATIONS UNDER THE AXIAL VIBRO-IMPACT LOAD

The paper presents the investigation results of vibro-drilling machine' drill-rod dynamic behavior under the action of axial vibro-impact load, in order to identify the frequency ranges of higher-order vibration excitation and make the analysis of the impact of such excitation on stability. The material destruction during the vibro-rotary drilling occurs via the complex effect of the vibration impulses and rotational motion. This fact significantly facilitates the drilling process of wells in hard rocks. In this case, the oscillations can occur with change of half-waves number which the mode of oscillations is changed. In this way, the task of the dynamic behavior of studying system in order to identify the frequencies of vibro-impact action at which the bending oscillations occurs with growth of half-wave number becomes interesting. To find such frequency ranges of axial impact load action on oscillating rod during rotation, the theoretical study was done by developed software, in which the technique of computer simulation of the oscillating motion of considerable length rotating rods under the action of axial periodic loads is implemented. Using this software the diagrams that show the ranges of impact frequencies in which the oscillations occurs with growth of half-wave number of rod elastic line were drawn for different parameters of the considered system. These diagrams were drawn against the background of dynamic stability fields depending on the ratio of rotation speed and impact frequency. The presented results show that for rods with different lengths there are ranges of frequencies of vibro-impact load at which the transverse oscillations occurs with growth of half-wave number. It is noted that with increasing of rotational speed for certain length rods the range of impact frequencies where the half-waves number is increased, expands. In this region, the oscillation amplitude is increases, too, with intensive growth in regions of unstable oscillations. The conclusion about the possibility of running the equipment in certain frequency ranges is made.

Keywords: geometric nonlinearity, inertia forces, vibro-impact loads, vibro-drilling, bend forms.

УДК 539.3

Лізунов П.П., Недін В.О. Стійкість стержнів, що обертаються, при збудженні згинальних коливань вищого порядку під час дії віброударного навантаження // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. – 2025. – Вип. 115. – С. 150-156.

В роботі наведені результати дослідження динамічної поведінки моделі робочого органу вібробурильної установки під дією поздовжнього віброударного навантаження з метою виявлення діапазонів частот збудження коливань вищого порядку.

Табл. 0. Іл. 8. Бібліогр. 11 назв.

UDC 539.3

Lizunov P.P., Nedin V.O. The stability of rotating rods during the excitation of higher-order bending oscillations under the axial vibro-impact load // Strength of materials and theory of structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. – 2025. – Issue 115. – P. 150-156.

The paper presents the investigation results of vibro-drilling machine' drill-rod dynamic behavior under the action of axial vibro-impact load, in order to identify the frequency ranges of higher-order oscillations excitation.

Tabl. 0. Fig. 8. Ref. 11.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельної механіки КНУБА, ЛІЗУНОВ Петро Петрович

Адреса: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА, кафедра будівельної механіки

Тел.: +38(044) 245-48-29

E-mail: lizunov@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2924-3025>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА, НЕДІН Валентин Олегович

Адреса: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА, кафедра будівельної механіки

Тел.: +38(044) 241-54-62

E-mail: nedin.vo@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3138-2892>