УДК
621.9.015

А.Ю. Горелова, М.Г. Кристаль

ВИБРОГАСИТЕЛЬ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГИДРОЦИЛИНДРОВ ШАХТНОЙ КРЕПИ

Предложен новый инструмент для обработки глубоких отверстий. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования процесса гашения колебаний инструмента по предложенному методу. При исследовании влияния соотношения частоты вынужденных и собственных колебаний межлюнетного участка системы «инструмент-заготовка» установлено наличие трех диапазонов устойчивого виброгашения. Поддержания частотной настройки системы в одном из этих диапазонов позволяет снизить амплитуду вибраций инструмента, оснащенного ГС положения на основе свойств двухстепенного гироскопа.
Ключевые слова: расточной инструмент, гироскопический стабилизатор для инструмента, динамический гаситель, демпфирование вибраций.

Введение

По данным Минэкономразвития в 2015 г. добыча угля в России возросла на 2,5% по сравнению с 2014 г. и продолжает увеличиваться. Развитие отрасли требует увеличения числа безопасных горнодобывающих комплексов, включающих механизированные крепи для поддержания кровли во время работ в забое и грузоподъемные машины. В качестве силовых элементов эти агрегаты используют гидроцилиндры, эксплуатационные характеристики которых во многом зависят от точности производства гильз. Для большинства цилиндров гильзы являются изделиями с глубокими отверстиями (ГО), так как соотношение их длины к диаметру превышает 10. Технологический процесс их производства сопровождается образованием характерных погрешностей продольного профиля отверстия: увод, отклонение от прямолинейности, бочкообразность, седлообразность, конусообразность и поперечного профиля: огранка, овальность отверстия [3, 4, 6, 7, 8]. На безопасность эксплуатации гидроцилиндров наибольшее влияние оказывают погрешности продольного профиля ГО гильзы, общей причиной которых являются вибрации в системе «инструмент-заготовка»

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 6. С. 50–59.
© 2017. А.Ю. Горелова, М.Г. Кристаль.

вследствие наличия: межлюнетного прогиба заготовки, биения в люнетах, погрешности обработки заходного участка, разностенности и неоднородности твердости материала заготовки, технологической наследственности [9].

Для обработки большинства длинномерных изделий используют две схемы обработки: инструмент совершает движение подачи вглубь вращающейся заготовки; инструмент, вращаясь, совершает движение подачи в невращающуюся заготовку. При этом периодически возникает момент, когда частота вынужденных колебаний системы «инструмент – заготовка», определяемая скоростью вращения инструмента или заготовки, становится кратной частоте собственных колебаний межлюнетного участка заготовки и возникает резонанс. Увеличившаяся амплитуда колебаний приводит к изменению взаимного расположения инструмента и заготовки и возникновению погрешностей продольного профиля отверстия.

Для уменьшения указанных погрешностей обработки ГО известны методы и инструменты, разработанные Боринг энд Трипэнинг Ассошиэйшн (БТА). Они предполагают комплексный подход, включающий специализированные станки, инструмент, дополнительное оборудование, обслуживание. Их применение не всегда целесообразно по причине высокой стоимости.

Другим путем является коррекция положения инструмента во время обработки ГО. Этому направлению посвящены работы М.Б. Диперштейна, Л.Л. Фрезинского, Р.Н. Кулагина, в том числе известна гидравлическая система управления траекторией инструмента В.Н. Тихенко. Известно применение гироскопов в качестве чувствительного элемента САУ положением оси инструмента [17]. Однако, по причине наличия временной задержки управляющего воздействия, применимость этих методов ограничена.

Исследования Е.Л. Николаи, А. Феппля, Э. Сперри, М. Шлика посвящены расчету конструктивных параметров двухстепенного гироскопа в карданове подвесе, позволяющим снизить амплитуду вынужденных колебаний систем, склонных к потере устойчивости, но не рассматривают его применение для стабилизации положения расточного инструмента [5].

Исследованиям в области динамики процесса растачивания и, в частности, влиянию динамических характеристик технологической системы на вибрации посвящены работы известных ученых М.П. Козочкина, Ф.С. Сабирова, однако недостаточно исследованы вопросы влияния соотношения частоты

вынужденных и собственных колебаний системы на точность обработки ГО. Исследованиям динамики формообразования посвящены работы И.Б. Шендерова, С.В. Кирсанова, однако модели формообразования рассмотрены с допущением о скомпенсированности вибраций инструмента и дисбаланса заготовки, вызванного прогибом ее межлюнетной части.

Влияние соотношения частоты вынужденных и собственных колебаний технологической системы на достижения заданной точности обосновано в работе А.И. Ушакова. Результатом исследований автора [9] является установление взаимосвязи параметров процесса растачивания глубокого отверстия и величины погрешностей его продольного и поперечного сечений. Предложены рекомендации по выбору параметров процесса растачивания, однако отсутствует информация по выбору расстояния между люнетами.

В области синтеза активных, использующий внешний источник энергии, и пассивных, расходующих запасенную энергию, динамических гасителей (ДГ) известны работы ряда российский [13, 14, 15, 16] и зарубежных исследователей [10, 11, 12]. Однако, вопросы применения ДГ для растачивания массивных длинномерных заготовок недостаточно изучены.

Таким образом, динамическая стабилизация расточного инструмента, в том числе с применением динамических гасителей колебаний и стабилизаторов на основе свойств двухстепенного гироскопа в кардановом подвесе, учитывающих частотные характеристики межлюнетного участка заготовки является актуальной задачей.

Теоретические основы

Предложена расчетная схема гироскопического стабилизатора (ГС) положения инструмента (рис. 1). При отклонении горизонтальной оси инструмента на угол φ, возникает гироскопический момент противодействующий этому повороту, который приводит к отклонению рамы гироскопа на угол ϑ. На раме закреплен груз, вес которого p не позволяет раме занять положение равновесия и она совершает колебания, что приводит к снижению амплитуды вынужденных колебаний инструмента и уменьшает его отклонение от заданной оси. Приведено математическое описание процесса стабилизации (1) [1, 2].

$$\begin{cases} J_0\ddot{\varphi} - C\omega\dot{\vartheta} + Pce\varphi = H\sin\mu t; \\ A\ddot{\vartheta} + C\omega\dot{\varphi} = -pb\vartheta - k_1\dot{\vartheta} - k_2\vartheta, \end{cases} \quad (1)$$

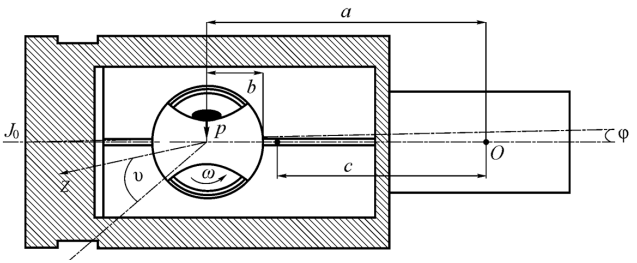

Рис. 1. Расчетная схема ГС положения инструмента: φ, рад – угол отклонения оси инструмента; ϑ, рад – угол поворота рамы гироскопа; ω, рад/с – скорость вращения ротора гироскопа; J_0, кг·м^2 – осевой момент инерции инструмента; Z – ось вращения ротора; O – центр колебаний; c, м – расстояние от центра колебаний до центра масс инструмента, оснащенного ГС положения; a, м – расстояние от центра масс инструмента, до центра масс гироскопа; b, м – радиус рамы гироскопа; p, Н – вес дополнительного груза

где J_0 – осевой момент инерции инструмента; $C\omega$ – мощность гироскопа; A – сумма центрального осевого момента инерции ротора и рамы; $k_1 = \beta l^2$ – сопротивление воздушного демпфера, $k_2 = Kl^2$ – сопротивление пружин.

Для количественной оценки стабилизации положения инструмента введен коэффициент эффективности виброгашения $\alpha = A_1/A_0$, где A_1 – амплитуда колебаний с вращающимся ротором гироскопа (с гироскопической стабилизацией); A_0 – амплитуда вынужденных колебаний без гироскопической стабилизации

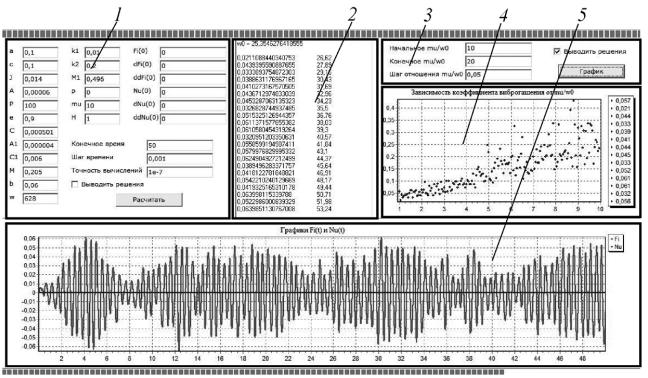

Рис. 2. Экранная форма программы расчета виброгашения: 1 – блок ввода переменных и начальных условий; 2 – блок вывода расчетных значений угла φ; 3 – блок задания диапазона изменения вынужденных колебаний; 4 – блок отображения результатов расчета коэффициента эффективности; 5 – блок построения функции φ(t), ϑ(t)

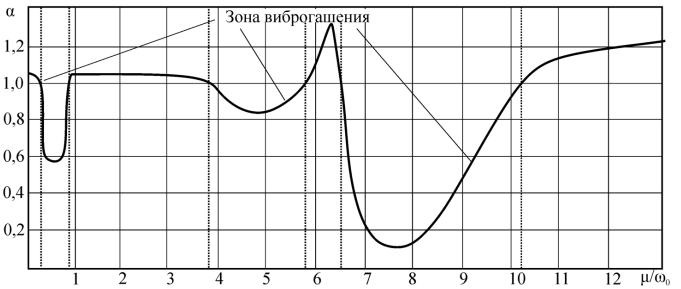

Рис. 3. Динамика виброгашения на диапазоне отношения частот $\mu/\omega_0 \in$ $\in [0,1...13]$

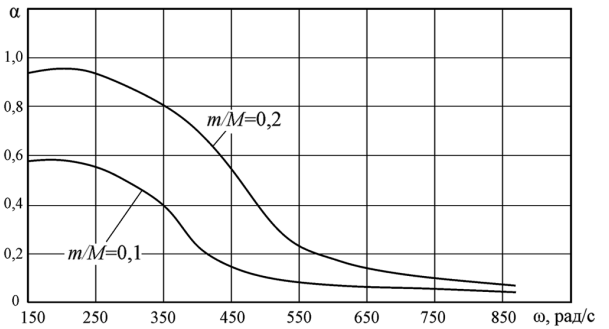

Рис. 4. Зависимость виброгашения α *от скорости вращения ротора* ω

(ω = 0). Система уравнений (1) решена численным методом по разработанному алгоритму. На рис. 2 представлена экранная форма программы расчета эффективности виброгашения. Вы-

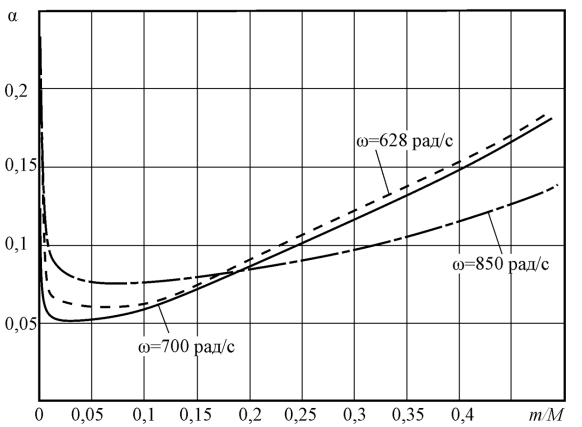

Рис. 5. Зависимость α *отношения массы ГС к массе модели*

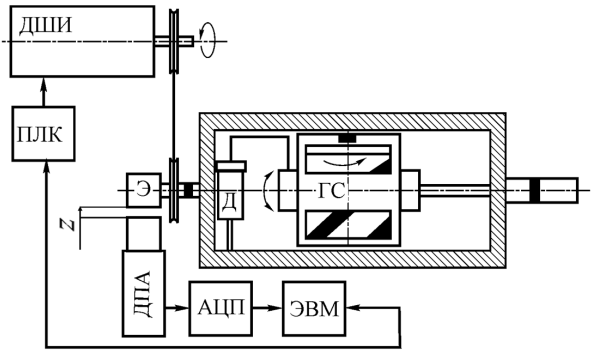

Рис. 6. Схема установки регистрации виброгашения

полнено численное моделирование системы уравнений (1) на основе предложенного алгоритма расчета. Установлено наличие трех зон устойчивого виброгашения: $\mu/\omega_0 = 0{,}45...0{,}8$; $\mu/\omega_0 = 3{,}75...5{,}75$; $\mu/\omega_0 = 6{,}5...10{,}25$ (рис. 3). Исследование зависимости эффективности виброгашения при изменении скорости ω вращения ротора ГС (рис. 4) показало, что наиболее эффективное виброгашение ($\alpha < 0{,}2$) достигают при $\omega > 450$ рад/с.

Исследование характера изменения коэффициента виброгашения для соотношений массы $m_{ГС}$ к общей массе M модели, лежащих в диапазоне $m_{ГС}/M = 0{,}01...0{,}5$ при $\omega > 450$ рад/с, позволило определить, что наиболее эффективное виброгашение ($\alpha < 0{,}1$) достигается при $m_{ГС}/M = 0{,}012...0{,}2$ (рис. 5).

Методика проведения экспериментов

Проверка теоретической модели виброгашения инструмента с использованием ГС произведена на экспериментальной установке (рис. 6, 7). Модель ГС содержит ротор *1*, установленный с возможностью вращения в раме *2*, которая соединена с возможностью поворота с корпусом модели, воздушным демпфером *3*

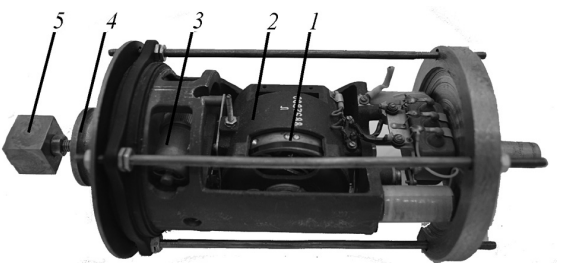

Рис. 7. Модель расточного инструмента, оснащенного ГС

и парой пружин (на рисунке не показаны). Такое соединение обеспечивает две степени свободы для гироскопа, третью степень свободы обеспечивает корпус модели, подвешенный на упругих подвесах (не показаны). При этом угол и скорость поворота рамы *2* конструктивно ограничены демпфером и пружинами. Модель ГС содержит шкив *4* и экран *5* в виде куба. Шкив *4* соединен ремнем с установленным с эксцентриситетом шкивом шагового двигателя ДШИ, скорость вращения которого определяет частоту μ вынужденных колебаний, задается программно через микроконтроллер (МК) MSP430G2. Таким образом, модель ГС совершает колебания, экран перемещается, изменяя величину зазора *z*, что регистрирует индукционный датчик перемещений ДПА-М18-76У-1110-Н.

Аналоговый сигнал от ДПА поступает в модуль АЦП/ЦАП Zetlab Z 210, обработку сигнала производят посредством программного обеспечения (ПО) Zetlab на стационарном компьютере. По показанию виртуальных приборов, входящих с состав указанного ПО определены значения напряжения, соответствующие расстоянию от датчика до экрана (величине зазора *z*). Для определения эффективности виброгашения $\alpha = A_1/A_0$ измерения производят два раза для каждого исследуемого соотношения μ/ω_0. При этом A_1 – амплитуда колебаний с вращающимся ротором гироскопа (с гироскопической стабилизацией); A_0 – амплитуда вынужденных колебаний без гироскопической стабилизации (рис. 8).

Для анализа адекватности математического описания экспериментально полученным данным для каждого эксперимента записан сигнал датчика ДПА длительностью шесть периодов и расчитан коэффициент эффективности виброагшения для амп-

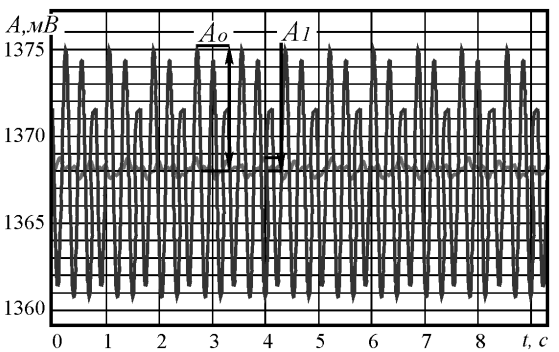

Рис. 8. Амплитуда колебаний модели при отношении $\mu/\omega_0 = 0{,}5$

литуд шести периодов основной гармоники. Расчетные значения принадлежат доверительному интервалу для опытных данных с вероятностью 95%, что подтверждает адевартность предложенной модели виброгашения.

Выводы и результаты

Разработана конструктивная схема расточного инструмента, оснащенного ГС на основе двухстепенного гироскопа (патент РФ №152126).

Предложена математическая модель виброгашения инструмента, оснащенного ГС положения, позволяющая установить зависимость виброгашения от рабочих и конструктивных параметров ГС. Анализ модели позволил определить, что при скоростях вращения ротора ГС $\omega > 150$ рад/с наиболее эффективное виброгашение ($\alpha < 0{,}2$) достигают при $\omega > 450$ рад/с. Наиболее эффективное виброгашение ($\alpha < 0{,}1$) достигают при $m_{ГС}/M =$ $= 0{,}012...0{,}2$ и скоростях вращения ротора ГС $\omega = 628$ рад/с, $\omega = 700$ рад/с, $\omega = 850$ рад/с.

Установлено, что для достижения наиболее эффективного виброгашения необходимо поддерживать соотношение μ/ω_0 в зоне устойчивого виброгашения: $\mu/\omega_0 = 0{,}45...0{,}8$; $\mu/\omega_0 = 3{,}75...$ $...5{,}75$; $\mu/\omega_0 = 6{,}5...10{,}25$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горелова А. Ю.* Гироскопическая стабилизация инструмента при обработке глубокий отверстий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 5. – С. 81–86.

2. *Горелова А. Ю.*, *Кристаль М. Г.* Инструмент для обработки гильз гидростоек, оснащенный стабилизатором // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 9. – С. 131–136.

3. *Костюкович С. С.*, *Дечко Э. М.*, *Долгов В. И.* Точность обработки глубоких отверстий. – Минск: Вышэйшая Школа, 1978. – 144 с.

4. *Минков М. А.* Технология изготовления глубоких точных отверстий. – М., Л.: Машиностроение, 1968. –183 с.

5. *Николаи Е. Л.* Теоретическая механика. Ч. 3. Изд. 2-е. – Л.-М.: ГОНТИ НКТП СССР, 1939. – 311 с.

6. *Отений Я. Н.*, *Смольников Н. Я.*, *Ольштынский Н. В.* Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий: монография. – Волгоград: ВолгГТУ, 2003. – 136 с.

7. *Троицкий Н. Д.* Глубокое сверление. – Л.: Машиностроение, 1971. – 176 с.

8. *Уткин Н. Ф.*, *Кижняев Ю. Н.*, *Плужников С. К.*, *Шаманин А. А.*, *Дроздов Ф. М.*, *Немцев Б. А.*, *Бычков Н. А.*, *Борзов В. Ф.* Обработка глубоких отверстий. – Л.: Машиностроение, 1988. – 269 с.

9. *Ушаков А. И.* Динамические процессы при обработке глубоких отверстий: дис. канд. техн. наук. – М., 1974. – 177 с.

10. *Deqing M., Tianrong K., Albert J.S., Zichen C.* Magnetorheological fluid-controlled boring bar for chatter suppression // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Pp. 1861–1870.

11. *Lu X., Chen F., Altintas Y.* Magnetic actuator for active damping of boring bars // Annals of the CIRP. 2014. Pp. 369–372.

12. *Matsubara A., Maeda M., Yamaji I.* Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and LR circuit // CIRP Annals–Manufacturing Technology. 2014. Pp. 373–376.

13. *Горелова А. Ю., Плешаков А. А., Кристаль М. Г.* Патент 152126 РФ МПК B23B29/00. Резцедержатель, демпфирующий вибрации. Опубл. 10.05.2015. Бюл. № 13.

14. *Корюкина Н. А.* Патент 2298456 РФ МПК B23 B29/02. Расточной инструмент. Опубл. 10.05.2007. Бюл. № 13.

15. *Михик П.* Патент 2365471 РФ МПК B23B29/00. Резцедержатель, демпфирующий вибрации. Опубл. 27.08.2009. Бюл. №24.

16. *Комашко С. Г., Комашко А. Г., Кулик Г. Н., Моисей М. В., Плужников С. К., Суздаль К. В., Тонконог А. Ю.* Патент 2421302 РФ на изобретение МПК B23B35/00. Способ сверления глубокого отверстия в детали. Опубл. 20.06.2011. Бюл. № 17.

17. *Bernd Aschenbach.* Patent DE 102004024170 A1 Int. Cl. B23C 9/00, B23B 29/12. Die folgenden Andaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen. 01.12.2005. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Горелова Ася Юрьевна[1] – аспирант, e-mail: forasyoo@gmail.com,
Кристаль Марк Григорьевич[1] – доктор технических наук, профессор, e-mail: crysmar@mail.ru,
[1] Волгоградский государственный технический университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 6, pp. 50–59.

UDC 621.9.015

A.Yu. Gorelova, M.G. Kristal

VIBRATION DAMPER FOR HYDRAULIC PROP BARREL MANUFACTURING INSTRUMENT

A great number of parts using in machine building industry contains deep holes. Their production requires a special tool with a large length-to-diameter ratio boring bar. Boring bar has significantly change its length during lengthy blanks processing. Therefore, natural frequency of «tool-blank» system has changed. Deep hole boring is inevitably accompanied by the appearance of the resonance, when the forced oscillation frequency, dependent on the operating mode, multiples the natural oscillation frequency of the tool. There is another one phenomenon accompanying the deep hole's machining, called chatter. This kind of self-excited vibration, that could also lead to resonance.

It causes various working errors to appear, the one hardest to reduce being the wall thickness variation, which is present due to the tool axis deviation in relation to the axis of the hole. Authors suggested a boring bar equipped with gyroscopic stabilizer. It contains of a frame mounted on the body of stabilizer by the means of cardan suspension, which provides two degrees of freedom for the gyroscope. The third degree of freedom is offered by the boring bar's body. Gyroscopic stabilizer mounted inside the boring bar and behind the tool. Thus, when the

boring bar starts to bend the frame simultaneously starts to swing and it achieves the lateral vibration suppression. The paper covers the proposed method of deep holes manufacturing. Presents a structure of gyroscopic stabilizer for boring bars with a large length-to-diameter ratio. It describes the experimental stand for the study of the process of damping by the proposed method and gives the experimental data.

It is established, that there are 3 vibration absorption ranges in forced vibration to the natural vibration frequency ratio: $\mu/\omega_0 = 0{,}45–0{,}8$; $\mu/\omega_0 = 3{,}75–5{,}75$; $\mu/\omega_0 = 6{,}5–10{,}25$. Achieving lower values of the vibrations amplitude requires the tool to be maintained in one of this ranges to minimize tool axis deviation.

Key words: The deep hole boring tool, Gyroscopic stabilizer of the tool, Damper for the tool, Vibration Suppression, Chatter.

AUTHORS

Gorelova A.Yu.[1], Graduate Student, e-mail: forasyoo@gmail.com,
Kristal M.G.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: crysmar@mail.ru,
[1] Volgograd State Technical University, 400005, Volgograd, Russia.

REFERENCES

1. Gorelova A.Yu. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2015, no 5, pp. 81–86.

2. Gorelova A.Yu., Kristal' M.G. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 9, pp. 131–136.

3. Kostyukovich S.S., Dechko E.M., Dolgov V.I. *Tochnost' obrabotki glubokikh otverstiy* (ТочнAccuracy of deep holes manufactur), Minsk, Vysheyshaya Shkola, 1978, 144 p.

4. Minkov M.A. *Tekhnologiya izgotovleniya glubokikh tochnykh otverstiy* (Technology of precise holes manufacturing), Moscow, Leningrad, Mashinostroenie, 1968, 183 p.

5. Nikolai E.L. *Teoreticheskaya mekhanika*. Ch. 3. Izd. 2-e (Theoretical mechanics, part 3, 2nd edition), Leningrad -Moscow, GONTI NKTP SSSR, 1939, 311 p.

6. Oteniy Ya.N., Smol'nikov N.Ya., Ol'shtynskiy N.V. *Progressivnye metody obrabotki glubokikh otverstiy*: monografiya (Progressive methods of deep holes manu-facturing: monograph), Volgograd, VolgGTU, 2003, 136 p.

7. Troitskiy N.D. *Glubokoe sverlenie* (Deep hole drilling), Leningrad, Mashinostroenie, 1971, 176 p.

8. Utkin N.F., Kizhnyaev Yu.N., Pluzhnikov S.K., Shamanin A.A., Drozdov F.M., Nemtsev B.A., Bychkov N.A., Borzov V.F. *Obrabotka glubokikh otverstiy* (Deep holes machining), Leningrad, Mashinostroenie, 1988, 269 p.

9. Ushakov A.I. *Dinamicheskie protsessy pri obrabotke glubokikh otverstiy* (Dynamic processes in the deep holes processing] dissertation), Candidate's thesis, Moscow, 1974, 177 p.

10. Deqing M., Tianrong K., Albert J.S., Zichen C. Magnetorheological fluid-controlled boring bar for chatter suppression. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, pp. 1861–1870.

11. Lu X., Chen F., Altintas Y. Magnetic actuator for active damping of boring bars. *Annals of the CIRP*. 2014. Pp. 369–372.

12. Matsubara A., Maeda M., Yamaji I. Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and LR circuit. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*. 2014, pp. 373–376.

13. Gorelova A.Yu., Pleshakov A.A., Kristal' M.G. *Patent RU 152126 MPK B23B29/00*, 10.05.2015.

14. Koryukina N.A. *Patent RU 2298456 MPK B23 B29/02*, 10.05.2007.

15. Mikhik P. *Patent RU 2365471 MPK B23B29/00*, 27.08.2009.

16. Komaishko S.G., Komaishko A.G., Kulik G.N., Moisey M.V., Pluzhnikov S.K., Suzdal' K.V., Tonkonog A.Yu. *Patent RU 2421302 MPK B23B35/00*, 20.06.2011.

17. Bernd Aschenbach. *Patent DE 102004024170 A1 Int. Cl. B23C 9/00, B23B 29/12*. Die folgenden Andaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen. 01.12.2005.