

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЩИХ ТЕОРЕМ ДИНАМИКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ИНЕРЦИОННОГО ИНСТРУМЕНТА

Бондаренко И.Р., Ковалев Л.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

Ключевые слова: силовые и энергетические параметры, инерционный инструмент, обработка внутренней поверхности, динамическое усилие, мощность.

Аннотация. В работе представлена задача об определении динамических силовых и энергетических параметров взаимодействия инерционного инструмента и обрабатываемой поверхности с использованием общих теорем динамики. Областью применения данного инструмента является механическая обработка внутренней поверхности труб, используемых в горнодобывающей промышленности. Целью данной работы является определение силы динамического взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью труб, а также потребляемой при этом мощности. Решение поставленной задачи позволит получить теоретические зависимости, устанавливающие связь между силовыми и энергетическими параметрами работы оборудования, а также его конструктивными и технологическими параметрами. При изучении движения зубчатого рабочего элемента инструмента применена теорема об изменении количества движения системы. В результате получены аналитические зависимости для расчета динамического усилия взаимодействия рабочего элемента инструмента с обрабатываемой поверхностью и мощности потребляемой приводом инструмента. Оценка теоретических результатов проводилась путем сравнения расчетных значений мощности, потребляемой в процессе обработки, с результатами, полученными при проведении натуральных экспериментов по обработке внутренней поверхности труб. В результате сравнительного анализа было установлено приемлемое соответствие расчетных значений мощности результатам эксперимента, что позволило сделать вывод о достаточной точности полученных аналитических зависимостей. Таким образом, была обоснована возможность использования полученных теоретических зависимостей при определении динамических рабочих параметров инструмента.

APPLICATION OF GENERAL DYNAMICS THEOREMS TO THE STUDY OF POWER AND ENERGY OPERATING PARAMETERS OF AN INERTIAL INSTRUMENT

Bondarenko I.R., Kovalev L.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Keywords: power and energy parameters, inertial tool, inner surface treatment, dynamic force, power.

Abstract. The paper presents the problem of determining the dynamic force and energy parameters of the interaction of an inertial tool and the treated surface using general dynamics theorems. The scope of application of this tool is the machining of the inner surface of pipes used in the mining industry. The purpose of this work is to determine the strength of the dynamic interaction of the tool with the processed surface of the pipes, as well as the power consumed in this case. The solution of the task will allow to obtain theoretical dependencies establishing a connection between the power and energy parameters of the equipment, as well as its design and technological parameters. During the research the movement of the toothed working element of the tool, the theorem on changing the amount of movement of the system is applied. As a result, analytical dependences are obtained for calculating the dynamic force of the interaction of the working element of the tool with the processed surface and the power consumed by the tool drive. The evaluation of the theoretical results was carried out by comparing the calculated values of the power consumed during processing with the results obtained during natural experiments on the processing of the inner surface of pipes. As a result of the comparative analysis, an acceptable correspondence of the calculated power values to the results of the experiment was established, which allowed us to conclude that the obtained analytical dependencies were sufficiently accurate. Thus, the possibility of using the obtained theoretical dependencies in determining the dynamic operating parameters of the tool was justified. Thus, the possibility of using the obtained theoretical dependencies in determining the dynamic operating parameters of the tool is justified.

Введение

Принципы и методы механики являются эффективными инструментами, позволяющими получить наглядные аналитические решения различных инженерных прикладных задач во многих технических областях [1, 2]. Так в данной работе представлено

применение одной из общих теорем динамики к исследованию силовых и энергетических параметров работы инерционного инструмента. Установки, оборудованные данным инструментом, нашли свое применение при ремонте насосно-компрессорных труб (НКТ), применяемых в горнодобывающей промышленности, а также при восстановлении пропускной способности транспортных трубопроводных систем, для разрушения осадочных дефектных слоёв, возникающих на их внутренних поверхностях [3-5] (рис. 1).

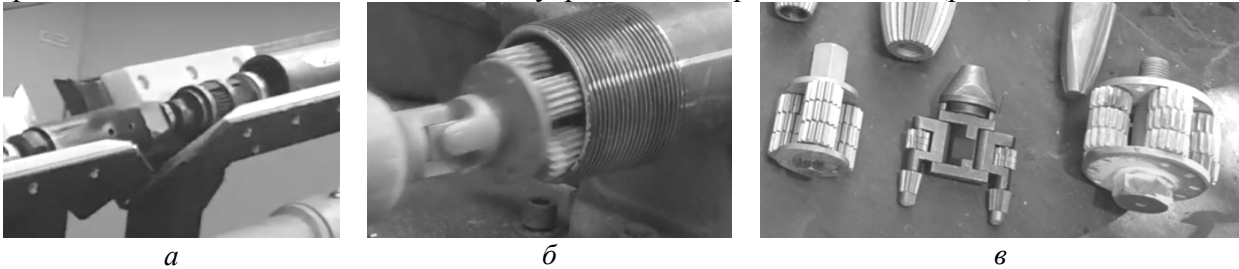


Рис. 1. Оборудование и инструмент для механической обработки внутренней поверхности труб: *а* – установка, предназначенная для очистки внутренней поверхности труб; *б* – зубчатая инерционная фреза для очистки внутренней поверхности труб; *в* – инерционный инструмент

При этом следует отметить, что для осуществления эффективной работы данного оборудования, а также его разработки и проектирования, необходимо наличие расчетных зависимостей для определения силовых и энергетических показателей процесса обработки. Таким образом, получение аналитических зависимостей, позволяющих установить связь между силовыми и энергетическими параметрами работы инструмента и оборудования, а также конструктивно-технологическими параметрами работы, является актуальным вопросом.

Материалы и методы исследований

При решении поставленной задачи на первом этапе кратко рассмотрим кинематику движения рабочего элемента инструмента (рис. 2). В соответствии с представленной схемой рабочий элемент совершает плоское движение с постоянной проекцией скорости центра масс равной V_{cy} . В какой-то момент времени t рабочий элемент, опираясь зубцом 1, наносит удар зубцом 2 по обрабатываемой поверхности. Очевидно, что сила динамического взаимодействия будет определяться скоростными параметрами движения рабочего элемента. При дальнейших выкладках и преобразованиях полагаем, что деформация обрабатываемой поверхности является упругой и, следовательно, мала по отношению к размерам рабочего элемента инструмента [6].

Для описания процесса взаимодействия рабочего элемента инструмента с поверхностью трубы в соответствии с [7-9] воспользуемся теоремой об изменении количества движения в виде:

$$m_{p3} \bar{V}_c - m_{p3} \bar{V}_{c0} = \sum \bar{S}_i, \quad (1)$$

где m_{p3} – масса рабочего элемента инструмента, \bar{V}_c , \bar{V}_{c0} – скорости центра масс рабочего инструмента в конце и начале взаимодействия зубца с поверхностью, $\sum \bar{S}_i$ – сумма импульсов всех сил, действующих на рабочий элемент. Учитывая принципы кинетостатики, на рабочий элемент будут действовать следующие силы: \bar{F} – движущая сила от внешнего вращающего момента передаваемому инструменту от привода; $\bar{\Phi}_z$ – центробежная сила инерции, обусловленная переносным движением рабочего элемента вокруг оси трубы; силы реакций поверхности \bar{R}_{ϕ_1} и \bar{R}_{ϕ_2} от действия силы $\bar{\Phi}_z$; силы сцепления \bar{F}_{c1} , \bar{F}_{c2} зубцов 1 и 2 с поверхностью; сила динамической реакции поверхности \bar{R}_d . При решении задачи, среди сил, действующих на рабочий элемент, будем рассматривать только силу динамической реакции поверхности, действующую на ударный зубец (рис. 2). Данная сила по модулю будет равняться силе давления зубца на поверхность и, следовательно, исходя из её динамического характера, является наиболее значимой [7-9].

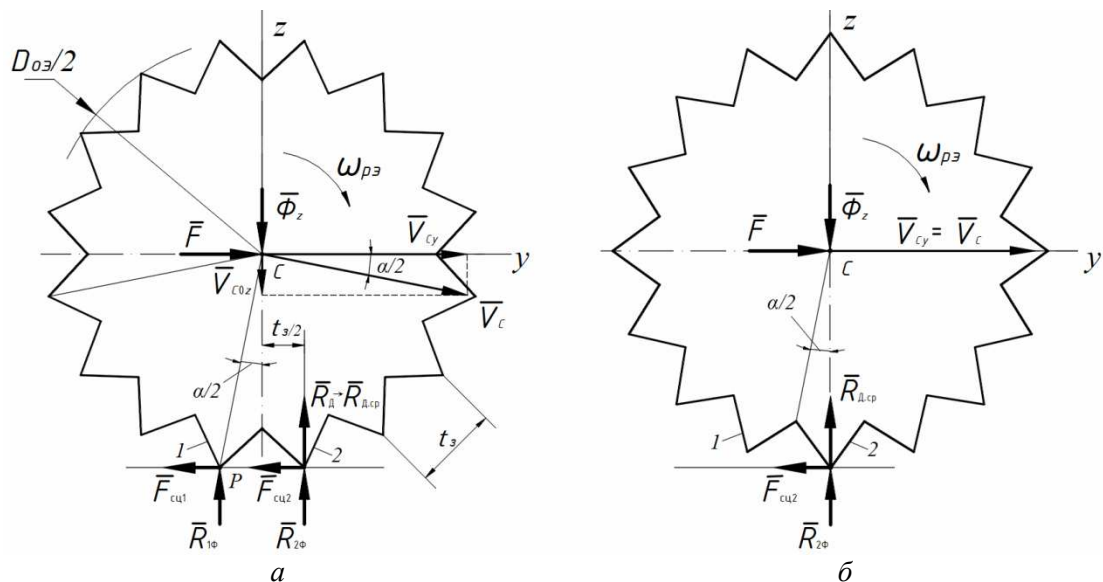


Рис. 2. Кинематика движения рабочего элемента при вдавливании:
 а – в начале взаимодействия; б – в конечном положении

Тогда правая часть уравнения (1) может быть определена как

$$\sum \bar{S}_i = \int_t^{t+t_{д.в}} \bar{R}_д \cdot dt = \bar{R}_{д.ср} \cdot t_{д.в}, \quad (2)$$

где $t_{д.в}$ – время динамического взаимодействия зубца рабочего элемента с поверхностью, $\bar{R}_{д.ср}$ – вектор средней силы динамической реакции за время $t_{д.в}$.

Запишем закон изменения количества движения в проекции на ось z , тогда с учётом (2) имеем

$$mV_{c0z} = R_{д.ср} \cdot t_{д.в}. \quad (3)$$

Учитывая кинематику движения рабочего элемента, определим составляющую скорости V_{c0z} . В момент касания зубца 2 поверхности (рис. 2, а) опорная точка P зубца 1 является мгновенным центром скоростей рабочего элемента, тогда проекция начальной скорости центра масс на ось z равна

$$V_{c0z} = V_{cy} \cdot tg(\alpha/2). \quad (4)$$

Из схемы, представленной на рисунке 3, выразим скорость V_c , приняв рабочий элемент в виде цилиндра, тогда

$$V_{cy} = \omega \cdot (D_{вн} - D_{рз})/2, \quad (5)$$

где ω – частота вращений инструмента.

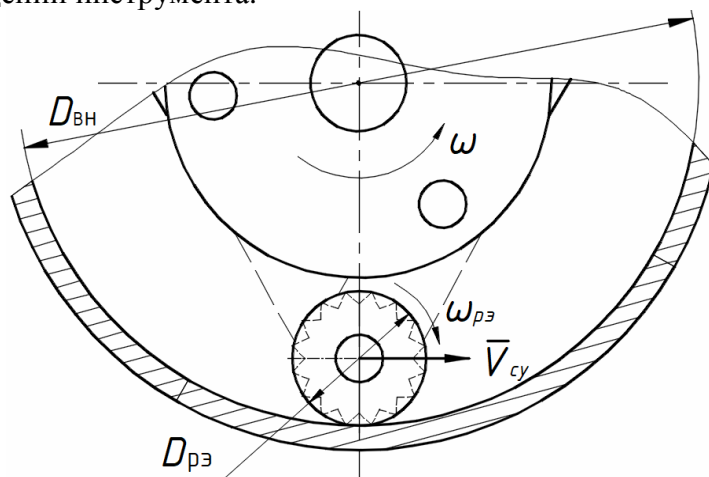


Рис. 3. К расчету кинематических параметров движения

Отметим при этом, что погрешность в определении скорости V_{cy} при принятии цилиндрической формы рабочего элемента составляет не более 3% по отношению к реальной.

Определим величину $R_{д.ср}$ при повороте рабочего элемента относительно ударного зубца из одного положения (рис. 2, а) в другое (рис. 2, б), угол поворота при этом будет равен $\alpha/2$. С учётом представленной схемы определим время взаимодействия зубца с поверхностью за данное угловое перемещение как

$$t_{д.в} = \frac{\alpha}{2 \cdot \omega_{рз}}, \quad (6)$$

где $\omega_{рз}$ – величина частоты вращений рабочего элемента, которая может быть определена с достаточной точностью из схемы, с учётом условия цилиндрической формы.

Учитывая равенство скоростей при движении центра рабочего элемента относительно оси трубы и мгновенного центра скоростей, выразим $\omega_{рз}$ через частоту вращения инструмента

$$\omega_{рз} = \frac{\omega \cdot (D_{вн} - D_{рз})}{D_{рз}} \quad (7)$$

Тогда учитывая, что в конечном положении величина $V_{сз}=0$ (рис.2, б), а также выражение (4), уравнение (3) принимает следующий вид:

$$m_{рз} V_{сз} \cdot tg(\alpha/2) = R_{д.ср} \cdot t_{д.в}. \quad (8)$$

Подставив (5) и (6), получим

$$m_{рз} \frac{\omega \cdot (D_{вн} - D_{рз})}{2} \cdot tg(\alpha/2) = R_{д.ср} \frac{\alpha}{2 \cdot \omega_{рз}}. \quad (9)$$

Откуда $R_{д.ср}$ с учетом (7) определится как

$$R_{д.ср} = m_{рз} \frac{\omega^2 \cdot (D_{вн} - D_{рз})^2}{\alpha \cdot D_{рз}} \cdot tg(\alpha/2). \quad (10)$$

Полученная зависимость может быть использована для определения мощности, которую можно найти из выражения

$$N = M_{с.д} \cdot \omega_{рз} \cdot n_{рз}, \quad (11)$$

где $M_{с.д}$ – момент динамического сопротивления на рабочем элементе, создаваемый силой $R_{д.ср}$ относительно оси рабочего элемента, $n_{рз}$ – число рабочих элементов.

Исходя из схемы (рис. 2, а), величину момента динамического сопротивления [10], учитывая (10), можно выразить как

$$M_{с.д} = R_{д.ср} \cdot \frac{t_3}{2} \cdot k_l, \quad (12)$$

где k_l – коэффициент, учитывающий изменение плеча силы $R_{д.ср}$ от $t_3/2$ до 0 (рис. 2, б), который можно принять равным $1/2$.

С учетом (12) выражение (11) примет вид:

$$N = R_{д.ср} \cdot \frac{t_3}{2} \cdot \omega_{рз} \cdot n_{рз} \cdot k_l \cdot k_T, \quad (13)$$

где k_T – коэффициент, учитывающий периодичность действия момента сопротивления $M_{с.д}$, который также можно принять равным $1/2$ [11]. Его введение обосновывается тем, что с момента начала контакта зубца, момент динамического сопротивления $M_{с.д}$, препятствующий перемещению, действует только половину периода контакта взаимодействующего зубца, при повороте его на угол $\alpha/2$ до вертикального положения (рис. 2, б).

Экспериментальные исследования

Оценка полученных аналитических зависимостей проводилась путём сопоставления результатов расчета с данными, полученными в ходе проведения эксперимента по обработке внутренней поверхности труб инерционным инструментом. Для проведения эксперимента была использована установка, оснащенная инерционным инструментом, приводом

инструмента, а также частотным преобразователем для контроля частоты вращения и измерения мощности потребляемой приводом (рис. 4, 5).

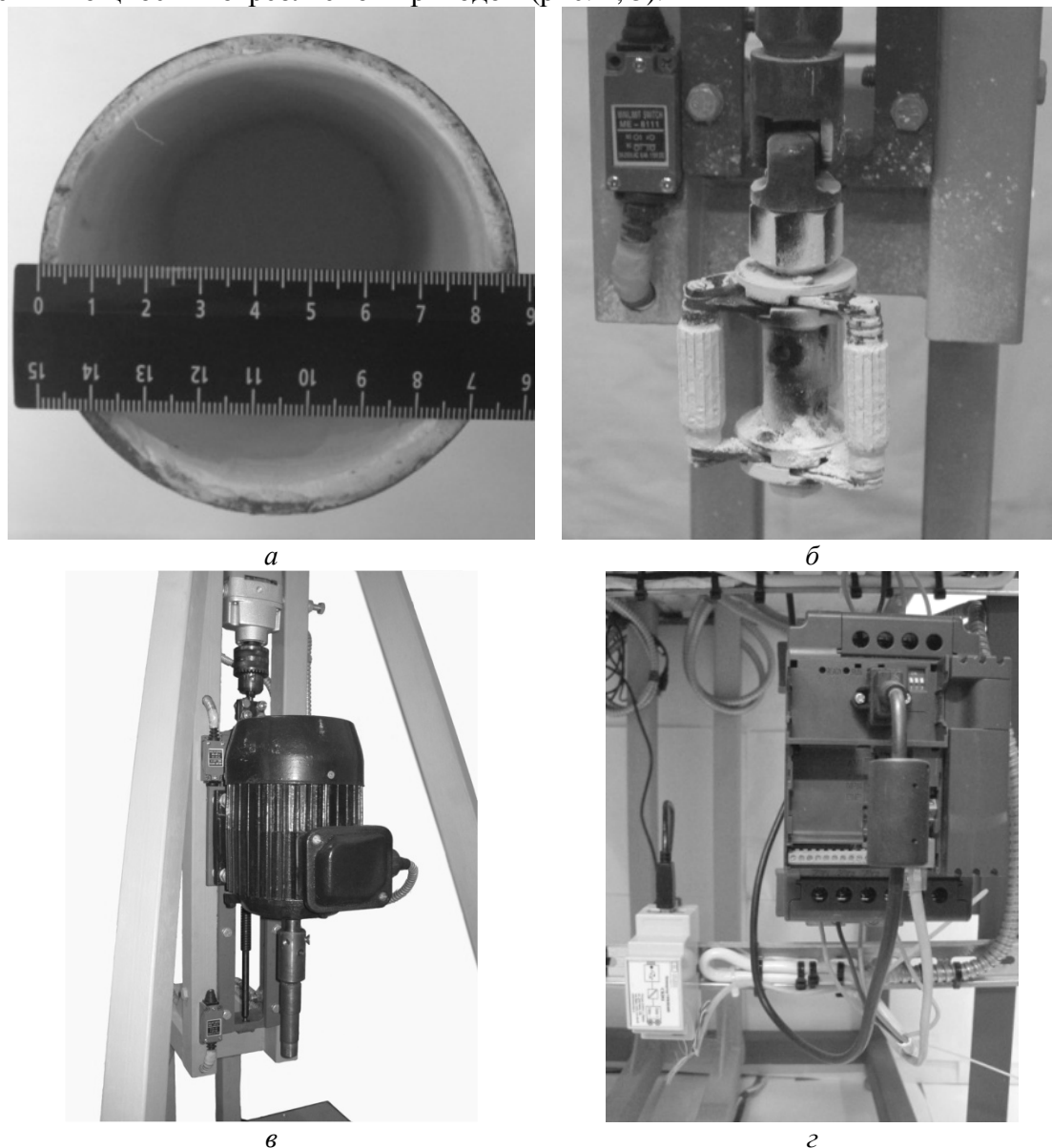


Рис. 4. Материалы и оборудование: *а* – экспериментальный образец; *б* – инерционный инструмент установки; *в* – привод инструмента; *г* – частотный преобразователь

В ходе эксперимента проводилась обработка внутренней поверхности образцов труб при следующих заданных условиях: частота вращения инструмента $n = 1500, 2000, 2500$ об/мин, внутренний диаметр трубы $D_{вн} = 82$ мм, диаметр рабочего элемента инструмента $D_{рз} = 15$ мм, угловой шаг зубцов рабочего элемента $\alpha = 22,5^\circ$, шаг зубцов $t_z = 3$ мм, масса рабочего элемента $m_{рз} = 0,096$ кг, число рабочих элементов $n_{рз} = 3$.

Величины ω и n связаны между собой зависимостью

$$\omega = \pi \cdot n / 30. \quad (14)$$

В дальнейшем был проведен сравнительный анализ данных, полученных в ходе проведения эксперимента и расчетных значений, полученных аналитически.

Результаты

Для сравнительного анализа результатов был произведен расчет потребляемой мощности с использованием выражений (10) и (13), для последующего их сопоставления с результатами эксперимента. Результаты вычислений и полученные экспериментальные данные приведены в таблице 1.

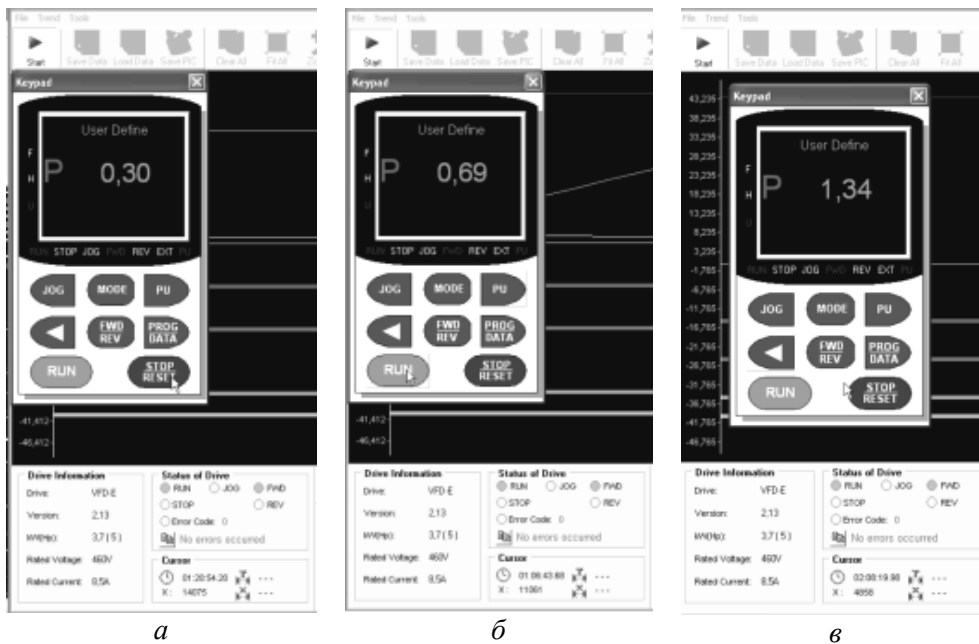


Рис. 5. Мощность обработки, измеренная с помощью интерфейса частотного преобразователя:
а – при $n = 1500$ об/мин; *б* – при $n = 2000$ об/мин; *в* – при $n = 2500$ об/мин

Табл. 1. Сравнительные результаты

n , об/мин	Значение мощности, кВт		Отклонение расчетных значений относительно результатов эксперимента	
	теорет.	эксп.	$ \Delta $	%
1500	0,27	0,3	0,03	10
2000	0,64	0,69	0,05	7,2
2500	1,24	1,34	0,1	7,5

Для вычисления расхождения данных было использовано выражение:

$$k_N = \frac{|N_p - N_э|}{N_э} \cdot 100\%, \quad (15)$$

где $|N_p - N_э|$ – абсолютное расхождение между расчетным и экспериментальными значениями.

Расхождение между полученными результатами определялось относительно мощности обработки, измеренной экспериментально. Максимальная величина расхождения составляет 10%, что является приемлемым в условиях наших исследований.

Заключение

По результатам теоретических исследований получены аналитические зависимости для определения усилия взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом, а также потребляемой мощности обработки в зависимости от конструктивных параметров инструмента и технологических режимов обработки. Практическая значимость полученных выражений заключается в возможности вычисления динамического усилия, необходимого для разрушения материала дефектного слоя в зависимости от его прочности, а также вычисления мощности обработки, что может быть использовано при проектировании и разработке оборудования.

Полученные теоретические зависимости находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными, что позволяет сделать вывод о возможности их применения при решении практических задач.

Список литературы

1. Смелягин А.И. О применении общих теорем динамики // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2016. – № 12. – С. 116-129.

2. Рачек В.М., Доброборский Г.А., Перевалов В.С., Вьюшина М.Н. Горная техника и технология в задачах механики (опыт кафедры теоретической и прикладной механики МГГУ) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002. – №10. – С. 201-202.
3. Бабинцева Т.В., Майзель И.Г. Метод восстановления пропускной способности трубопроводов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – №2(26). – С. 17-24.
4. Очистка НКТ [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nts-leader.ru/services/remont-i-servis-trub/diagnostika-i-remont-nkt/ochistka-nkt>.
5. Научно-исследовательская технологическая лаборатория. Каталог. Устройства для внутренней очистки труб [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nitl.ru/catalog/ustrojstva_dlja_ochistki_trub.
6. Ворovich И.И., Александров В.М. Механика контактных взаимодействий. – М.: Физматлит, 2001. – 672 с.
7. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Коваленко М.В. Теория удара в строительстве и машиностроении: Научное издание. – М: Изд-во АСВ, 2006. – 336 с.
8. Нехаев В.А., Николаев В.А. Динамика плоского движения твердого тела (методы и алгоритмы решения задач динамики твердого тела при наличии сил трения): учебное пособие. – Омск: ОмГУПС, 2016. – 251 с.
9. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики. Статика. Кинематика. Динамика: учеб. пособие. – Изд. 7-е, стер. – СПб.: Лань, 1999. – 764 с.
10. Балицкий П.В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины. – М.: Недра, 1975. – 293 с.
11. Фомин К.В. Моделирование и расчет вероятностных характеристик момента сопротивления на рабочем органе дорожной фрезы // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2019. – № 3. – С. 407-417.

References

1. Smelyagin A.I. On the application of general dynamics theorems // Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU". 2016, no. 12, pp. 116-129.
2. Rachek V.M., Dobroborsky G.A., Perevalov V.S., Vyushina M.N. Mining machinery and technology in problems of mechanics (experience of the Department of Theoretical and Applied Mechanics of Moscow State University) // Mining information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2002, no. 10, p. 201-202.
3. Babintseva T.V., Maisel I.G. Method of restoring pipeline capacity // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2010, no. 2(26), pp. 17-24.
4. Cleaning of tubing [Electronic resource]. – URL: <https://www.nts-leader.ru/services/remont-i-servis-trub/diagnostika-i-remont-nkt/ochistka-nkt>.
5. Research technological laboratory. Catalog. Devices for internal pipe cleaning [Electronic resource]. – Access mode: https://nitl.ru/catalog/ustrojstva_dlja_ochistki_trub.
6. Vorovich I.I., Alexandrov V.M. Mechanics of contact interactions. – М.: Физматлит, 2001. – 672 p.
7. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Kovalenko M.V. Theory of impact in construction and mechanical engineering: Scientific edition. – М.: Publ. house ASV, 2006. – 336 p.
8. Nekhaev V.A., Nikolaev V.A. Dynamics of plane motion of a solid body (methods and algorithms for solving problems of dynamics of a solid body in the presence of friction forces): textbook. – Омск: OSTU, 2016. – 251 p.
9. Yablonsky A.A., Nikiforova V.M. Course of theoretical mechanics. Static. Kinematics. Dynamics: studies manual. – Ed. 7th, erased. – SPb.: Lan, 1999. – 764 p.
10. Balitsky P.V. Interaction of the drill string with the bottom of the well. – М.: Nedra, 1975. – 293 p.
11. Fomin K.V. Modeling and calculation of probabilistic characteristics of the moment of resistance on the working body of a road milling cutter //Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University. 2019, no. 3, pp. 407-417.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Бондаренко Иван Русланович – кандидат технических наук, доцент	Bondarenko Ivan Ruslanovich – candidate of technical sciences, associate professor
Ковалев Леонид Александрович – кандидат технических наук, доцент	Kovalev Leonid Alexandrovich – candidate of technical sciences, associate professor
ivanbond85@rambler.ru	

Получена 30.11.2022