

УДК 669.01:621.7/2.002

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНТАКТНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Султанов Н.Л., Тютеряков Н.Ш., Пашенко К.Г.
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, e-mail: mgtu@magtu.ru

В работе рассмотрены решения по определению параметров для разработки математической модели контактно-гидродинамического расчета подшипников качения для станов холодной прокатки. Были проведены лабораторные и промышленные эксперименты. Таким образом, учитывая полученные экспериментальные, лабораторные исследования и обобщенные положения при определении толщины масляной пленки, была разработана программа для ЭВМ по контактно-гидродинамическому расчету подшипников качения, при различных режимах эксплуатации станов холодной прокатки, позволяющая выявлять отклонения от заданных параметров и своевременно изменять режимы смазки.

Ключевые слова: контактная гидродинамика, вязкость, механика, подшипники качения

DEVELOPMENT OF ROLLING BEARINGS CONTACT HYDRODYNAMIC MATH MODEL CALCULATION

Zhirkin Y.V., Mironenkov E.I., Sultanov N.L., Tyuteryakov N.S., Pashchenko K.G.
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, e-mail: mgtu@magtu.ru

In work on the characterization of solutions for the development of a mathematical model of contact-hydrodynamic calculation of bearings for cold rolling mills. Experiments were made laboratory and industrial. Thus, considering the received pilot, laboratory studies and the generalized provisions at determination of oil film thickness, the computer program for contact hydrodynamic calculation of rolling bearings was developed, at various modes of operation of cold rolling mills, allowing to reveal deviations from the given parameters and to change greasing modes in time.

Keywords: contact hydrodynamics, oiliness, mechanics, bearings

Изучение гидродинамики и значение гидродинамической теории смазки для современного производства актуально, так как она дает возможность рационального проектирования и использования подшипников качения, которые в данное время широко используются в различных механизмах и агрегатах.

Первые попытки по развитию и изучению методик по определению теории контактно-гидродинамики были сформулированы в 1883 – 1886 гг. профессором Н.П. Петровым. В то время явления движения вязких жидкостей были мало исследованы, так как работы Осборна Рейнольдса, которые разъяснили сущность ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости, были тогда еще мало известны, а следовательно, не было известно, когда возможно, применение уравнений движения вязкой жидкости Навье – Стокса. Ввиду этого Н.П. Петров посвятил значительную часть своей работы доказательству самой возможности применения упомянутых уравнений к вопросу о движении жидкости.

Одним из таких уравнений является определение параметра контактной гидро-

динамики ε [11], который по В.П. Петрову рассчитывается по зависимости

$$\varepsilon = \frac{\mu U}{fP}, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость смазочной жидкости, Па·с; U – скорость, м/с; f – коэффициент трения; P – давление на единицу поверхности, Па.

В зависимости В.П. Петрова степени скорости U коэффициента трения f , давления на единицу поверхности P равны единице, а пьезокэффициент вязкости и коэффициент изменения толщины масляной пленки не учитывались.

Существует ещё несколько общеизвестных положений [4, 5] для определения толщины масляной пленки, рассмотренные в работах Эртеля – Грубина, Хиггинсона, Хэмрок-Джекобсон, Доусона, Ратнера, где учтены вышеуказанные параметры и коэффициенты. На основании обобщения их работ предложена зависимость толщины масляной пленки, выраженная в безразмерных параметрах:

$$H = \overline{\kappa} U^a G^b q_H^c, \quad (2)$$

где k – константа, включающая модуль упругости; U – суммарная скорость качения; a – коэффициент, характеризующий суммарную скорость качения; G – приведенный радиус кривизны поверхностей; b – коэффициент, характеризующий радиусы кривизны поверхностей; q_H – эквивалентная статическая нагрузка на единицу длины

контакта; c – коэффициент, характеризующий параметр нагрузки.

На рис. 1 представлен контакт ролика с дорожкой в динамике совместно со смазочным материалом.

При экспериментальных исследованиях данных ученых были получены коэффициенты, представленные в табл. 1.

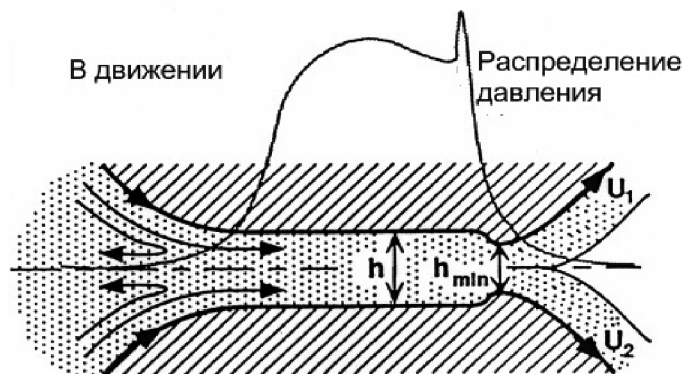


Рис. 1. Контакт ролика с дорожкой в динамике совместно со смазочным материалом

Таблица 1
Коэффициенты показателей для определения толщины масляной пленки при экспериментальных исследованиях

Авторы	K	a	b	c
Эртель – Грубин	1,95	0,727	0,727	– 0,091
Хиггинсон	1,6	0,7	0,6	– 0,13
Хэмрок-Джекобсон	3,07	0,71	0,57	– 0,11
Доусон	2,65	0,7	0,54	– 0,13
Ратнер	3,17	0,75	0,6	– 0,15

Вследствие того, что рабочие условия редко бывают идеальными и на практике не всегда удается записать в явном виде полную систему уравнений, достаточно точно отражающую свойства объекта, и определить из нее критерии подобия, возникает необходимость использования соотношений сил, действующих в объекте, так называемый метод подобия [2, 12, 15].

При использовании теории подобия и проведении экспериментальных исследований, для определения моментов сопротивления в подшипниках качения применяются различные подходы. Например, при определении коэффициента по толщине пленки смазочного материала m_{h0} и контактных напряжений m_{σ} использовалась формула Ратнера (3), с коэффициентом, характеризующим суммарную скорость

качения, равным 0,75, коэффициентом, характеризующим радиусы кривизны поверхностей, 0,4 и коэффициентом, характеризующим параметр нагрузки, – 0,15:

$$h_0 = 3.17(\eta U_{\Sigma})^{0.75} \alpha^{0.6} \rho_{np}^{0.4} q_H^{-0.15}, \quad (3)$$

где η – динамическая вязкость масла при атмосферном давлении и рабочей температуре, Па·с; U_{Σ} – суммарная скорость качения на контакте, м/с; α – пьезокоэффициент вязкости, Па⁻¹; ρ_{np} – приведенный радиус кривизны поверхностей трения, м; q_H – нагрузка на единицу длины контакта, Н/м.

Для более корректного описания изменения толщины масляной пленки в зависимости от скорости и усилий прокатки на стане 2000 холодной прокатки были проведены лабораторные исследования. Используя экспериментальную установку для

моделирования процессов смазки в подшипниковых узлах рабочих и опорных валков, выявлены закономерности.

В соответствии с теорией подобия, используя зависимость (3), заменим все величины через их масштабные коэффициенты:

$$m_{h0} = (m_{\eta} m_{U_{\Sigma}})^{0.75} m_{\alpha}^{0.6} m_{\rho_{\text{пр}}}^{0.4} m_{qH}^{-0.15}. \quad (4)$$

При использовании одного и того же смазочного материала на реальных объектах и экспериментальных установках

можно определить, что масштабные коэффициенты динамической вязкости при атмосферном давлении и рабочей температуре $m_{\eta} = 1$ и пьезокоэффициента вязкости $m_{\alpha} = 1$. В связи с принятыми выше допущениями получим зависимость:

Тогда зависимость (4) примет вид

$$m_{U_{\Sigma}}^{0.75} m_{\rho_{\text{пр}}}^{0.4} m_{qH}^{-0.15} = 1. \quad (5)$$

Технические характеристики подшипников представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики подшипников

Параметры	Обозначение	Коуо	№ 97516
		Величины	
Внутренний диаметр, мм	d	317	80
Средний диаметр, мм	D_0	369,5	110
Диаметр ролика, мм	D_p	23	14,7
Длина ролика, мм	l	40	23,4
Число тел качения, шт.	Z	39	19
Количество рядов роликов, шт.	i	4	2
Угол контакта, град	β	15	15

Для заданных условий найдём масштабный коэффициент приведенного радиуса кривизны поверхностей трения $m_{\rho_{\text{пр}}}$ [3, 6, 18]:

$$\rho_{\text{пр}} = \frac{D_W}{2} (1 + \gamma); \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{D_W}{d} \cos \alpha_0; \quad (7)$$

$$m_{\rho_{\text{пр}}} = \frac{D_W^B}{D_W^M} \frac{(1 + \gamma^B)}{(1 + \gamma^M)}. \quad (8)$$

Из вышеперечисленных формул определим

$$\gamma^B = \frac{23}{369,5} 0,96596 = 0,062;$$

$$\gamma^M = \frac{14,7}{110} 0,96596 = 0,13;$$

$$m_{\rho_{\text{пр}}} = \frac{23(1 + 0,062)}{14,7(1 + 0,13)} = 1,47.$$

Для определения масштабного коэффициента нагрузки на единицу длины контакта m_{qH} воспользуемся зависимостью [3, 6, 18]:

$$q_H = \frac{4,6 P}{Zil}. \quad (9)$$

Соответственно

$$m_{qH} = \frac{m_p}{m_z m_i m_e}. \quad (10)$$

Из решения вышеперечисленных зависимостей получаем

$$m_z = \frac{39}{19} = 2,05;$$

$$m_i = \frac{4}{2} = 2;$$

$$m_e = \frac{40}{23,4} = 1,71.$$

$$m_z m_i m_e = 2,05 \cdot 2 \cdot 1,71 = 7,01.$$

Нагрузку на подшипник P_B найдём с учётом горизонтальной составляющей давления металла на валки $P = 35$ МН и усилия противоизгиба $P_{\text{пр}} = 500$ кН [14]:

$$P_B = \sqrt{\left(\frac{Pa}{2A}\right)^2 + P_{\text{пр}}^2}, \quad (11)$$

где P – давление металла на валки, Н; a – величина смещения оси рабочего валка относительно оси опорного валка, м; A – межосевое расстояние, $P_{\text{пр}}$ – усилие противоизгиба, Н;

$$P_B = \sqrt{\left(\frac{35 \cdot 10^3 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,695}\right)^2 + 500^2} = 515 \text{ (кН)}.$$

Нагрузка на подшипник ЭУ задаётся равной 6 кН, тогда

$$m_p = \frac{515}{6} = 88, \text{ а } m_{qH} = \frac{88}{7,01} = 12,55.$$

Используя зависимость (5), определим значение масштабного коэффициента суммарной скорости качения m_{U_Σ} :

$$m_{U_\Sigma} = \frac{1}{m_{\text{рпр}}^{0,53} m_{qH}^{-0,15}}; \quad (12)$$

$$m_{U_\Sigma} = \frac{1}{1,47^{0,53} \cdot 12,55^{-0,15}} = 1,35.$$

Взаимосвязь между суммарной скоростью качения U_Σ и числом оборотов n определяется зависимостью [5]

$$U_\Sigma = \frac{\pi D_0 n}{60} (1 + \gamma). \quad (13)$$

Тогда масштабный коэффициент числа оборотов n m_n найдём из зависимости

$$m_{U_\Sigma} = m_{D_0} m_n m_{(1+\gamma)}. \quad (14)$$

Для

$$m_{D_0} = \frac{369,5}{110} = 3,35, \quad m_{(1+\gamma)} = \frac{1+0,062}{1+0,13} = 0,939$$

получаем

$$m_n = \frac{1,35}{3,36 \cdot 0,94} = 0,43.$$

Тогда частота вращения вала на ЭУ должна быть равна:

$$n_m = 2,32 n_B.$$

Из технологической инструкции [14] частота вращения по всем клетям для стана 2000 холодной прокатки приведена в табл. 3.

Таблица 3

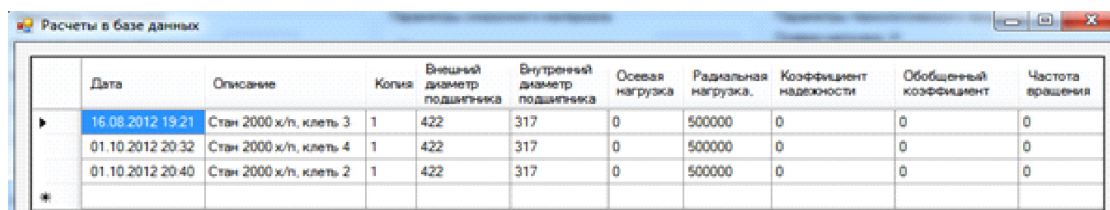
Частота вращения рабочих валков по всем клетям

Номер клетки	1	2	3	4	5
n_s (рабочих валков), об./мин	0–345	0–50	0–756	0–962	0–995

Таким образом, частота вращения вала на ЭУ должна составлять 1200 об./мин для условий 2-й рабочей клетки и 1700 об./мин – для условий 3-й рабочей клетки стана. В дальнейшем с использованием приведенных зависимостей была проведена серия лабораторных экспериментов на экспериментальной установке моделирования процессов смазывания в подшипниковых узлах [7], с различными классами вязкости (КВ) смазочного материала (мм/с²), такими как: И 40 с КВ 68, И 100 РС, с КВ 100, Mobil 600 XP 220 с КВ 220, ТНК 460 с КВ 460.

Используя вышеперечисленные зависимости и проведенные лабораторные исследования, разработали программу для ЭВМ в среде Visual Basic по контактно-гидродинамическому расчету подшипников качения для станов холодной прокатки при скорости прокатки до 2000 м/мин и нагрузках до 40 МН. Интерфейс программы с показаниями входных данных представлен на рис. 2, интерфейс программы с сохраненным расчетом в базе данных изображен на рис. 3 [13].

Рис. 2. Интерфейс программы с показаниями входных данных



	Дата	Описание	Копия	Внешний диаметр подшипника	Внутренний диаметр подшипника	Осевая нагрузка	Радиальная нагрузка	Коэффициент надежности	Обобщенный коэффициент	Частота вращения
▶	16.08.2012 19:21	Стан 2000 х/п, клеть 3	1	422	317	0	500000	0	0	0
	01.10.2012 20:32	Стан 2000 х/п, клеть 4	1	422	317	0	500000	0	0	0
	01.10.2012 20:40	Стан 2000 х/п, клеть 2	1	422	317	0	500000	0	0	0
*										

Рис. 3. Интерфейс программы с сохраненным расчетом в базе данных

Таким образом, учитывая полученные экспериментальные, лабораторные исследования и обобщенные положения при определении толщины масляной пленки, была разработана программа для ЭВМ в среде *Visual Basic* по контактно-гидродинамическому расчету подшипников качения при выбранных технологических условиях работы стана холодной прокатки, позволяющая выявлять отклонения от заданных параметров и своевременно изменять режимы смазки. В программе имеется возможность сохранения исходных условий и результатов расчета в базе данных, может быть использована как в учебном процессе, так и на практике при решении вопросов продления ресурса подшипников качения.

Модель контактно-гидродинамического расчета подшипников качения, реализованная в программе, актуальна для узлов трения машин бесфильтрного волочения проволоки [1, 8, 19, 20], а также для узлов трения алмазно-канатных машин и другого оборудования, задействованного при добыче блочного высокопрочного камня [9, 10, 16, 17].

Список литературы

- Бахматов Ю.Ф., Пащенко К.Г., Кальченко А.А., Белов А.С., Тютяряков Н.Ш. Совмещенный процесс бесфильтрного волочения и очистки поверхности катанки // *Металлург*, 2014. – № 4. – С. 88-91.
- Веников, В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников, Г.А. Веников. – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.
- Дудоров, Е.А. Комплексное конструирование тяжелонагруженных узлов трения металлургических машин с повышенными ресурсными характеристиками при масляно-воздушном смазывании: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Дудоров. – Магнитогорск, 2013. – 171 с.
- Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
- Коднир Д.С., Жильников Е.П., Байбородов Ю.И. Эластогидродинамический расчёт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 160 с.: ил.
- Мироненков Е.И. Повышение ресурса подшипников качения рабочих валков широкополосовых станов созданием режима эластогидродинамической смазки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. – М., 2007. – 109 с.
- Пат.55130 РФ, МПК G01M 13/04. Установка для измерения момента сопротивления в подшипниках качения / Жиркин Ю.В., Железков О.С., Мироненков Е.И., Юрченко Г.Н., Дудоров Е.А. – Опубл. 27.07.2006, Бюл. № 21. – 2 с.
- Пащенко К.Г., Бахматов Ю.Ф., Голубчик Э.М. Влияние пластического растяжения – изгиба в совмещенном процессе удаления окалина – волочения на свойства проволоки // *Сталь*. – 2011. – № 3. – С. 47-49.
- Першин Г.Д., Уляков М.С. Анализ влияния режимов работы канатных пил на себестоимость отделения монолитов камня от породного массива // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 2. – С. 125-135.
- Першин Г.Д., Уляков М.С. Повышение эффективности разработки месторождений блочного высокопрочного камня // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2014. – № 7. – С. 10-18.
- Петров Н.П. Гидродинамическая теория смазки. [Текст] / Петров Н.П. Издательство академии наук СССР, 1948. – 160 с.
- Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad // *Сборник научных трудов Sworld*. Вып. 2. Том 11. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. – С. 64-73.
- Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С., Шаров В.Н. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction // *Сборник научных трудов Sworld*. Выпуск 3. Том 14. Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. С. 39-42.
- Султанов Н. Л. Использование теории подобия при разработке параметров механической модели для определения моментов сопротивления в подшипниках качения / Н.Л. Султанов, Ю.В. Жиркин, Е.И. Мироненков и др. // *Materiály viii mezinárodní vědecko-praktická konference: сб. докл.* – Прага, Чехия, 2012. – С. 30-35.
- Седов Л.М. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1987. – 432 с.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611708. Математическая модель контактно-гидродинамического расчета подшипников качения / Султанов Н.Л., Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И. и др.; ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».
- Технологическая инструкция / ЛПЦ №11. – Магнитогорск, 2011.
- Эйгенсон, Л.С. Моделирование. – М.: 1952. – 230 с.
- Bakhmatov Y.F., Pashchenko K.G. Plastic Machining of Wire Rod in Die-Free Drawing, in the Presence of Ultrasound // *Steel in Translation*, 2014, Vol. 44, № 8, pp. 607–609.
- Pashchenko K.G., Bakhmatov Y.F., Golubchik E.M. Influence of plastic tension-flexure on the wire properties in scale removal and drawing // *Steel in Translation*, 2011, Vol. 41, № 3, pp. 246–249.

References

1. Baxmatov Y.F., Pashchenko K.G., Kalchenko A.A., Belov A.S., Tyutyryakov N.S. Sovmeshennyj process besfilernogo volocheniya i ochistki poverxnosti katanki // Metallurg. – 2014. – № 4. – pp. 88-91.
2. Venikov V.A. Teoriya podobiya i modelirovaniya [Tekst] / V.A. Venikov., G.A. Venikov. – M.: Vyssh. shk., 1984. – 439 p.
3. Dudorov E.A. Kompleksnoe konstruirovaniye tyazhe-lonagruzhennykh uzlov treniya metallurgicheskikh mashin s povyshennymi resursnymi karakteristikami pri maslo-vozdushnom smazyvani: dis. ... kand. texn. nauk. – Magnitogorsk, 2013. – 171 p.
4. Kodnir, D.S. Kontaktnaya gidrodinamika smazki detalej mashin [Tekst] / D.S. Kodnir. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 304 p.
5. Kodnir D.S., Zhilnikov E.P., Bajborodov Y.I. Elastogidrodinamicheskij raschyot detalej mashin. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 160 p.: il.
6. Mironenkov E.I. Povyshenie resursa podshipnikov kacheniya rabochix valkov shirokopolosovykh stanov sozdaniem rezhima elastogidrodinamicheskoy smazki: dis. ... kand. texn. nauk: 05.02.13. – M., 2007. – 109 p.
7. Pat.55130 RF, MPK GO1M 13/04. Ustanovka dlya izmereniya momenta soprotivleniya v podshipnikax kacheniya / Y.V. Zhirkin, O.S. Zhelezkov, E.I. Mironenkov, G.N. Yurchenko, E.A. Dudorov. – Opubl. 27.07.2006, Byul. № 21. – 2 p.: il.
8. Pashchenko K.G., Baxmatov Y.F., Golubchik E.M. Vliyanie plasticheskogo rastyazheniya – izgiba v sovmeshennom processe udaleniya okaliny – volocheniya na svojstva provoloki // Stal. 2011. № 3. pp. 47-49.
9. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Analiz vliyaniya rezhimov raboty kanatnyx pil na sebestoimost' otdeleniya monolitov kamnya ot porodnogo massiva // Fiziko-texnicheskie problemy razrabotki poleznyx iskopaemyx. – 2014. – № 2. – pp. 125-135.
10. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Povyshenie effektivnosti razrabotki mestorozhdenij blochnogo vysokoprochnogo kamnya // Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Gornyj zhurnal. – 2014. – № 7. – pp. 10-18.
11. Petrov N.P. Gidrodinamicheskaya teoriya smazki. – Izd-vo akademii nauk SSSR, 1948. – 160 pp.
12. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad // Sbornik nauchnyx trudov Sworld. Vypusk 2. Tom 11. – Odessa: KUPRIENKO, 2013. – pp. 64-73.
13. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S., Sharov V.N. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction // Sbornik nauchnyx trudov Sworld. Vyp. 3. Tom 14. – Odessa: KUPRIENKO, 2013. – pp. 39-42.
14. Sultanov N.L. Ispolzovanie teorii podobiya pri razrabotke parametrov mexanicheskoy modeli dlya opredeleniya momentov soprotivleniya v podshipnikax kacheniya / N.L. Sultanov Y.V. Zhirkin, E.I. Mironenkov i dr. // Materialy VIII mezinárodní vědecko-praktická konference: sb. dokl. – Praha, Chexiya, 2012. – pp. 30-35.
15. Sedov L.M. Metody podobiya i razmernosti v mexanike [Tekst] / L.M. Sedov. – M.: Nauka, 1987. – 432 p.
16. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2013611708. Matematicheskaya model kontaktno-gidrodinamicheskogo rascheta podshipnikov kacheniya / Sultanov N.L., Zhirkin Y.V., Mironenkov E.I. i dr. – FGBOU VPO «Magnitogorskij gosudarstvennyj texnicheskij universitet im. G.I. Nosova».
17. Texnologicheskaya instrukciya / LPC № 11. – Magnitogorsk, 2011.
18. Ejgenson, L.S. Modelirovanie / L.S. Ejgenson. – M.: 1952. – 230 p.
19. Bakhmatov Y.F., Pashchenko K.G. Plastic Machining of Wire Rod in Die-Free Drawing, in the Presence of Ultrasound // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44, № 8. – pp. 607-609.
20. Pashchenko K.G., Bakhmatov Y.F., Golubchik E.M. Influence of plastic tension-flexure on the wire properties in scale removal and drawing // Steel in Translation. – 2011. – Vol. 41, № 3. – pp. 246-249.